NEUROANATOMÍA

Fundamentos de neuroanatomía estructural, funcional y clínica

Edgar Osuna Suárez

Editor

Luis Enrique Caro Henao

Gustavo Patiño Fernández

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA · 1867

NEUROANATOMÍA

Fundamentos de neuroanatomía estructural, funcional y clínica

Centro Editorial
Facultad de Medicina
Universidad Nacional de Colombia
Sede Bogotá

« »

medicina básica

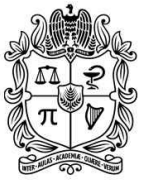
NEUROANATOMÍA

Fundamentos de neuroanatomía estructural, funcional y clínica

Edgar Osuna Suárez
Luis Enrique Caro Henao
Gustavo Patiño Fernández

Diciembre de 2016

« »



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Catalogación en la publicación Universidad Nacional de Colombia

Osuna Suárez, Edgar Danilo, 1951-
Neuroanatomía / Edgar Osuna Suárez, Luis Enrique Caro Henao, Gustavo Patiño Fernández. -- Primera edición. -- Bogotá : Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá). Facultad de Medicina, 2016.
196 páginas: ilustraciones a color. -- (Medicina básica)

Incluye referencias bibliográficas
ISBN 978-958-775-926-6 (rústica). -- ISBN 978-958-775-927-3 (e-book). -- ISBN 978-958-775-928-0 (impresión bajo demanda)
Contenido: volumen 1. Fundamentos de neuroanatomía estructural, funcional y clínica

1. Neuroanatomía 2. Neurofisiología 3. Sistema nervioso -- Anatomía & histología 4. Neurorradiografía 5. Estudios de casos I. Caro Henao, Luis Enrique, 1951- II. Patiño Fernández, Gustavo III. Título IV. Serie

NLM WL101 / 2016

Neuroanatomía. Fundamentos de neuroanatomía estructural, funcional y clínica
© Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá
Facultad de Medicina
© Vicerrectoría de Sede Bogotá
Dirección de Investigación y Extensión – DIEB
© Editor
Edgar Osuna Suárez
Primera edición, 2016
ISBN: 978-958-775-926-6 (Papel)
ISBN: 978-958-775-927-3 (Digital)
ISBN: 978-958-775-928-0 (IPD)

Facultad de Medicina

Decano
Ariel Iván Ruiz Parra
Vicedecano de Investigación y Extensión
Fernando Pío de la Hoz Restrepo
Vicedecano Académico
Juan Manuel Arteaga Díaz
Coordinadora Centro Editorial
Angela Manuela Balcázar Muñoz

Preparación editorial
Centro Editorial Facultad de Medicina
upublic_fmbog@unal.edu.co

Diseño editorial
Beatriz Osuna
Diseño de carátula
Beatriz Osuna / Oscar Gómez Franco
Corrección de estilo

Diagramación
Oscar Gómez Franco
Corrección ortotipográfica
Javier Carrillo Zamora
Colección

Todas las imágenes de esta obra son propiedad de los autores salvo cuando se indique lo contrario.
Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.
Los conceptos emitidos son responsabilidad de los autores y no comprometen el criterio de los editores o el de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia.

AUTORES

Edgar Osuna Suárez
Profesor titular
Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá
Facultad de Medicina
Departamento de Morfología

Profesor clínico
Hospital Universitario Fundación Santa Fe de Bogotá
Facultad de Medicina
Universidad de los Andes

Luis Enrique Caro Henao
Profesor titular
Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá
Facultad de Medicina
Departamento de Morfología

Gustavo Patiño Fernández
Profesor asistente
Universidad de Oakland
Facultad de Medicina William Beaumont
Departamento de Ciencias Biomédicas

CONTENIDO

Capítulo 1
CONCEPTOS GENERALES

Orientación anatómica
Planos de orientación
Otros términos de uso común
Introducción a la histología del sistema nervioso
Neuronas
Glía en el sistema nervioso central
Glía en el sistema nervioso periférico
Introducción a la neuroanatomía
Cerebro
Tronco cerebral
Cerebelo
Cordón espinal
Introducción a la neurorradiología clínica
Tomografía axial computarizada (TAC)
Imágenes por resonancia magnética (IRM)
Neuroangiografía
Referencias

Capítulo 2

DESARROLLO DEL SISTEMA NERVIOSO

Formación de las vesículas

Migración neuronal

Crecimiento axonal

Signos no difusibles para el crecimiento axonal

Signos difusibles para el crecimiento axonal

Formación de sinapsis

Ejercicios clínicos

Referencias

Capítulo 3

HISTOLOGÍA DEL SISTEMA NERVIOSO

Neuronas
Glía
Lecturas recomendadas

Capítulo 4

CEREBRO

Configuración superficial

Cara inferior
Cara lateral
Cara medial

Configuración interior

Cortes horizontales
Ejercicios clínicos
Cortes coronales
Sistema ventricular
Ejercicios clínicos

Referencias

Capítulo 5

TRONCO CEREBRAL

Configuración superficial

Mesencéfalo

Sustancia negra
Núcleos rojos
Sustancia gris periacueductual
Fascículos del mesencéfalo
Ejercicios clínicos

Puente o protuberancia

Región basal del puente
Tegmento del puente
Ejercicio clínico

Médula oblongada o bulbo raquídeo

Región basal de la médula
Tegmento de la médula
Ejercicios clínicos

Cerebelo

Cuarto ventrículo

Plexos coroideos

Ejercicios clínicos

Referencias

Capítulo 6

CORDÓN ESPINAL

Configuración exterior

Configuración interior

Sustancia gris

Sustancia blanca

Ejercicios clínicos

Referencias

Capítulo 7

CIRCULACIÓN DEL ENCÉFALO Y DEL CORDÓN ESPINAL

Circulación arterial del encéfalo

Circulación anterior
Circulación posterior
Polígono cerebral o de Willis
Ejercicios clínicos

Circulación arterial del cordón espinal

Arterias radiculares
Arterias espinales posteriores
Arteria espinal anterior
Ejercicio clínico

Circulación venosa del encéfalo

Senos venosos
Venas cerebrales
Venas del tronco cerebral y del cerebelo

Circulación venosa del cordón espinal

Ejercicio clínico

Referencias

Capítulo 8

MENINGES

DURAMADRE

Duramadre craneana

Duramadre raquídea

Aracnoides

Piamadre

Líquido Cefalorraquídeo

Ejercicios clínicos

Referencias

Capítulo 9

EVOLUCIÓN DEL SISTEMA NERVIOSO

Origen del sistema nervioso

Sistema nervioso en protóstomos

Protóstomos Lophotrochozoa

Protóstomos Ecdysozoa

Sistema nervioso en deuteróstomos

Deuteróstomos no cordados

Deuteróstomos cordados invertebrados

Deuteróstomos craniata o vertebrados

Sistema nervioso central en vertebrados

Cordón espinal

Bulbo raquídeo o médula oblongada

Sistema reticular

Cerebelo

Mesencéfalo

Diencéfalo

Telencéfalo

Cambios en el tamaño encefálico de vertebrados

Tamaño relativo

Tamaño absoluto

Cambios morfofuncionales en Hominoideos y Homíninos

Tamaño del encéfalo

Modificaciones funcionales y de conducta en primates

Diferencias entre humanos y demás primates

Lecturas recomendadas

Índice analítico

PREFACIO

EVITAR LA NEUROFOBIA

Entre los estudiantes de pregrado y posgrado de las diferentes áreas de la salud, las neurociencias suscitan cierto rechazo o fobia por diversas razones como, por ejemplo, la complejidad de su nomenclatura y sus funciones, el tiempo que demanda su aprendizaje y el método pedagógico mediante el cual se enseñan.

En artículos publicados en diferentes revistas, algunos autores han señalado que la neurofobia surge cuando el estudio de la neuroanatomía se extiende al estudio de otras áreas como la neurofisiología y la neurología clínica. Uno de los factores que desmotiva más a los estudiantes de neuroanatomía es que por años se han enseñado aspectos que resultan irrelevantes en la práctica clínica y dificultan el aprendizaje en esta área. Por tal razón, a menudo se solicita a los docentes de neurociencias que enfoquen su enseñanza en los aspectos más básicos y simples, y que estimulen al estudiante a profundizar en estos. Así pues, es necesario dedicar más tiempo en el currículo para la enseñanza de la neuroanatomía y señalar al estudiante desde un principio la aplicabilidad de este conocimiento en la práctica clínica.

Los objetivos principales de este libro son: evitar la neurofobia, enseñar de manera simple y escalonada diferentes aspectos sobre la neuroanatomía y su correlación iconológica y clínica, y resaltar la importancia de la neuroanatomía en la interpretación de imágenes diagnósticas —como la tomografía axial por computador (tac) y la resonancia magnética nuclear (rmn)— y de hallazgos clínicos. Se espera que esta obra sea interesante para el lector y contribuya de manera sencilla a su comprensión sobre la complejidad de la neuroanatomía. Todos los comentarios y sugerencias serán útiles para enriquecer futuras ediciones.

El segundo volumen de esta obra estará dedicado a los aspectos neurofuncionales y su aplicación en la neurología clínica (casos clínicos).

Edgar Osuna Suárez MD

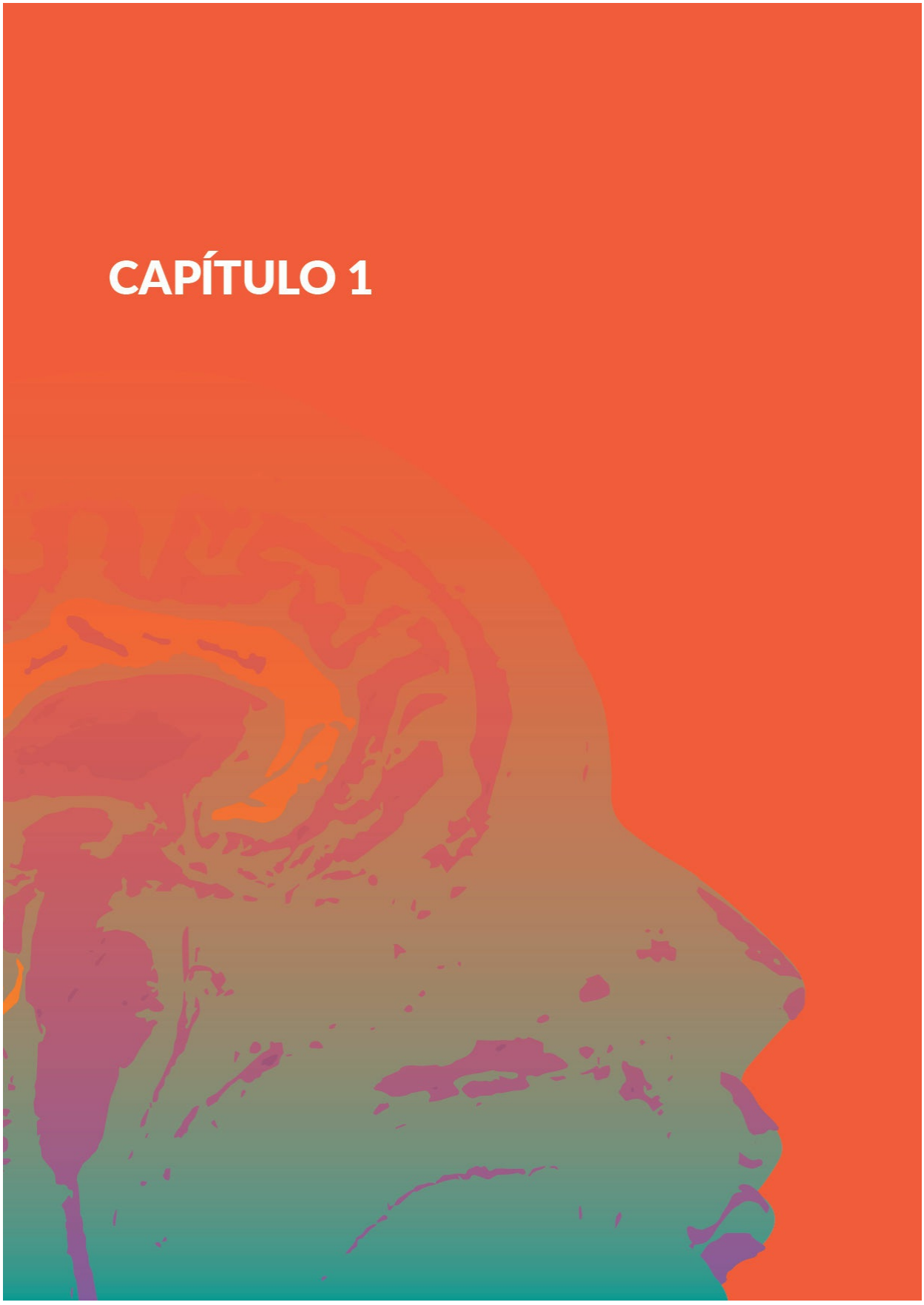
LECTURAS RECOMENDADAS

1. Schon F, Hart P, Fernandez C. Is clinical neurology really so difficult? J Neurol Neurosurg Psychiatry. 2002;72(5):557-9.
2. Flanagan E, Walsh C, Tubridy N. 'Neurophobia' – attitudes of medical students and doctors in Ireland to neurological teaching. Eur J Neurol. 2007;14(10):1109-12.
3. Lim E, Seet R. Demystifying neurology: preventing 'neurophobia' among medical students. Nat Clin Pract Neurol. 2008;4(8):462-3. http://doi.org/bck55f.

AGRADECIMIENTOS

Por su importante colaboración y contribución a este proyecto, el Centro Editorial de la Facultad de Medicina y los autores agradecen a Alejandro Tobón MD, del Departamento de Neurología, University of Texas Health Science Center at San Antonio; Daniel Vela MD, del Departamento de Neurología, Stroke Unit, School of Medicine, University of Colorado, Denver; y Carlos Florido MD, Director del Departamento de Morfología, Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

CAPÍTULO 1



CONCEPTOS GENERALES

Las neurociencias agrupan diferentes disciplinas que se dedican al estudio del sistema nervioso desde distintas perspectivas. Entre estas disciplinas están la neuroanatomía, la neurofisiología, la neurología, la neuropatología, la neurofarmacología, las ciencias comportamentales y la biología molecular. Para el desarrollo de estas, es fundamental tener conocimiento de la conformación estructural macroscópica (neuroanatomía) y microscópica (neurohistología) del sistema nervioso. El propósito de este libro es mostrar al lector, de manera escalonada, la complejidad morfológica del sistema nervioso y la forma en que sus diferentes estructuras se relacionan para producir múltiples comportamientos y, cuando ocurre una falla, alteraciones clínicas.

Desde el punto de vista neuroanatómico y funcional, el sistema nervioso se divide en: sistema nervioso central (SNC o neuroeje) y sistema nervioso periférico (SNP). El SNC se encarga de procesar la información sobre el medio ambiente y el estado del cuerpo para generar un comportamiento adecuado en respuesta a los estímulos analizados. El SNC está constituido por el encéfalo, que ocupa la cavidad craneana, y el cordón espinal, que ocupa parte del conducto raquídeo. El SNP está compuesto por los pares craneanos, relacionados de alguna manera con el cráneo, y los pares raquídeos, relacionados con las vértebras. Los nervios periféricos son los responsables de llevar información aferente o sensitiva desde la periferia hacia el SNC, e información eferente o motora desde el SNC hacia los órganos blanco, como músculos y glándulas (figura 1.1).

Figura 1.1. Esquema general de la estructura del sistema nervioso.

El sistema nervioso central requiere de protección especial; por eso se encuentra recubierto por el cráneo, las vértebras que forman el conducto raquídeo y tres capas de tejido conjuntivo denominadas meninges: la duramadre, la aracnoides y la piamadre. La duramadre es la capa más externa y gruesa, la piamadre es la capa que tapiza la superficie del neuroeje y, entre estas dos membranas, se encuentra la aracnoides, que se adhiere a la cara interna de la duramadre. Entre la aracnoides y la piamadre se encuentra el espacio subaracnoideo, que contiene líquido cefalorraquídeo (LCR). En este líquido se encuentra suspendido todo el neuroeje. Las secciones en las que el espacio subaracnoideo se ensancha se conocen como cisternas. Un ejemplo de estas es la cisterna lumbar, que se observa en la figura 1.2. En esta figura se aprecia también el filum terminale, una prolongación de la piamadre que une el cordón espinal a la duramadre. El ligamento coccígeo es una prolongación de la duramadre que se fija al hueso cóccix.

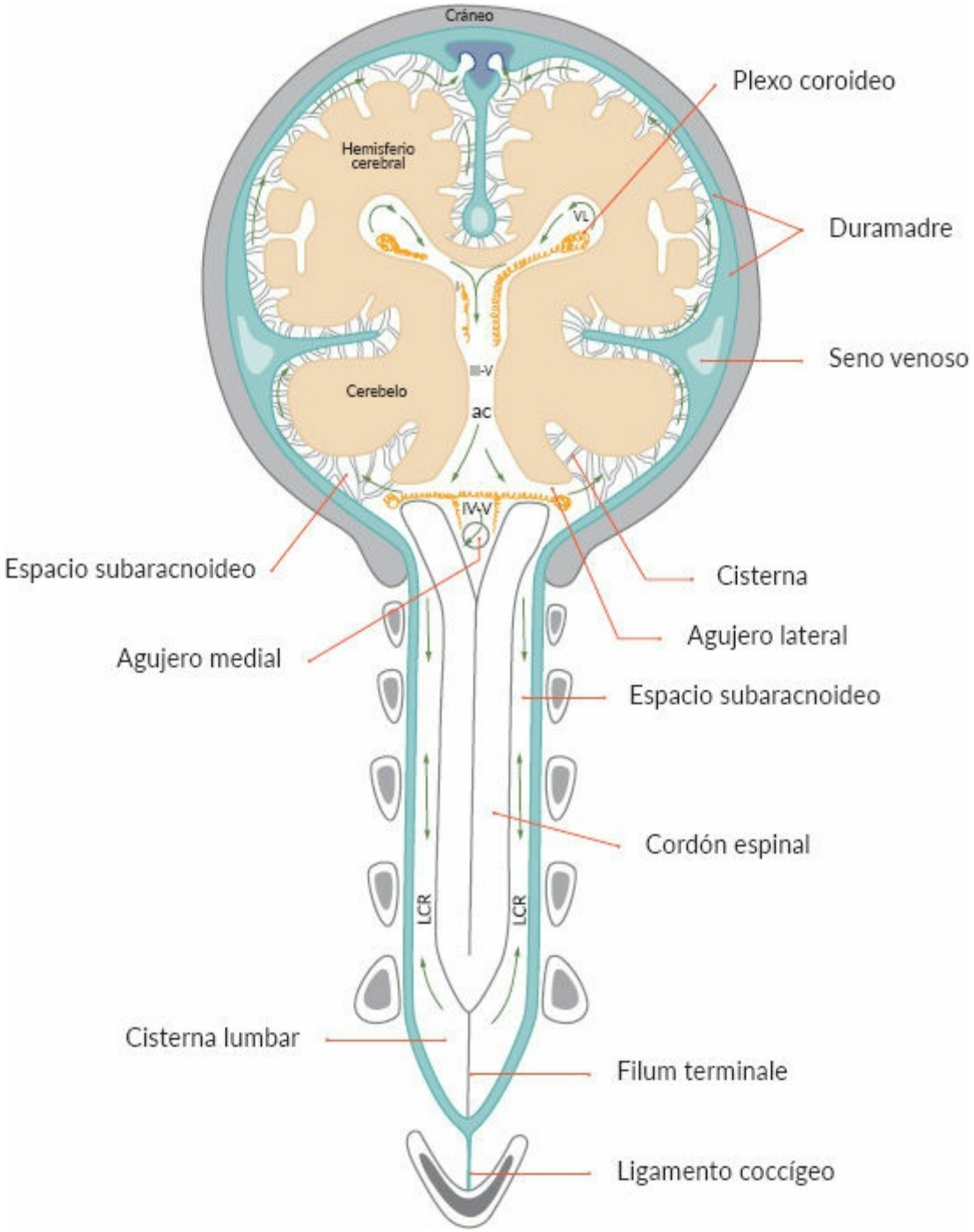


Figura 1.2. Esquema del sistema nervioso central (neuroeje) recubierto por el cráneo, las vértebras, las meninges y el LCR (→). VL: ventrículo lateral; III–V: tercer ventrículo; IV–V: cuarto ventrículo; ac: acueducto cerebral; 1: agujero interventricular.

Orientación anatómica

Para la descripción de direcciones y planos de cortes en el estudio del sistema nervioso se utiliza un vocabulario específico. En ciertas especies animales como los reptiles, los roedores o los peces, cuyo sistema nervioso tiene una orientación linear, se emplean los términos de la figura 1.3.

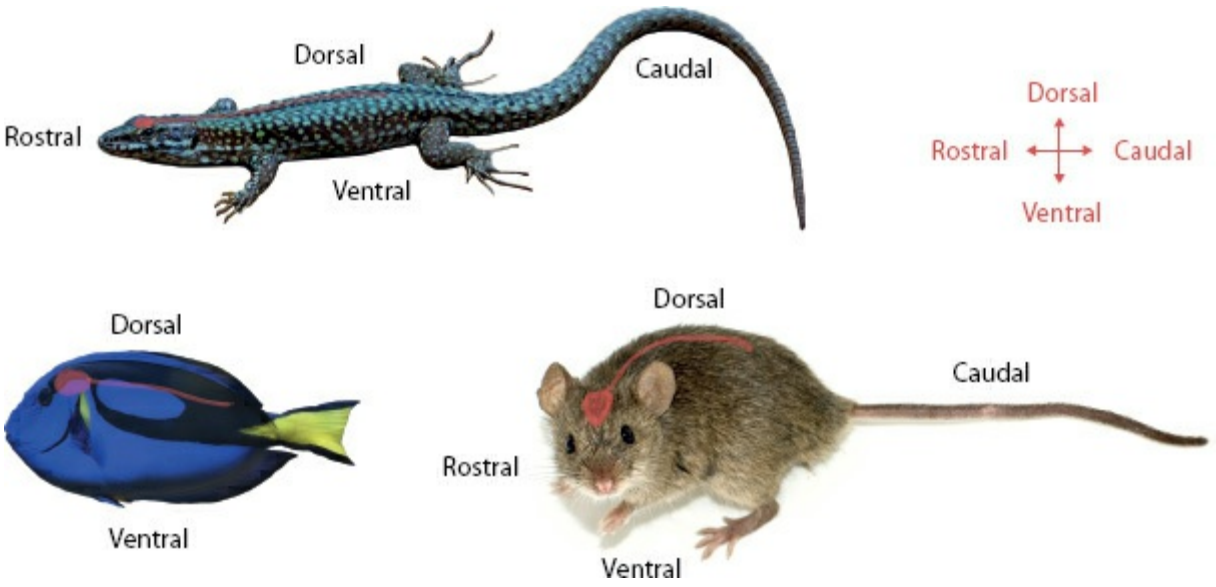


Figura 1.3. Orientación del sistema nervioso central en reptiles, peces y roedores. **Fuente:** adaptadas de (1–3).

La palabra ventral (del latín venter: vientre) designa la sección que mira hacia la tierra, dorsal (del latín dorsum: revés o espalda) denota la parte que mira hacia el firmamento, rostral (del latín rostrum: pico) es la sección del hocico o trompa, y caudal es la sección de la cola. El uso de estos términos cambia en los humanos dada su postura bípeda. El sistema nervioso humano presenta una acodadura cercana a los 90º entre el encéfalo y el cordón espinal, es decir, a nivel del mesencéfalo. De manera que las estructuras que están por encima del mesencéfalo mantienen una orientación similar a la de los reptiles. Pero del mesencéfalo hacia el cordón espinal, esta orientación sufre una rotación de 90º y asume una posición perpendicular a la tierra, como lo indica la figura 1.4.

En síntesis, las relaciones espaciales en el encéfalo y el cordón espinal se describen con los siguientes términos:

Medial–lateral: medial significa «hacia el plano medio o sagital» y lateral, «en dirección opuesta al plano medio».

Rostral–caudal: por encima del mesencéfalo, rostral significa «hacia la porción frontal del hemisferio» y caudal, «hacia la porción posterior del hemisferio». A nivel del mesencéfalo y debajo de este, rostral significa «hacia la corteza cerebral» y caudal, «hacia la región sacra».

Dorsal–ventral: por encima del mesencéfalo, dorsal se refiere a la parte superior del hemisferio cerebral y ventral, a la parte inferior de este. Del mesencéfalo hacia el cordón espinal, dorsal denota la superficie posterior del cuerpo y ventral designa la superficie anterior del cuerpo.

Existen otros términos que se utilizan con frecuencia para la orientación del SNC y que permanecen constantes respecto al entorno, para las estructuras

situadas tanto encima como debajo del mesencéfalo (figura 1.4). Estos son:

Anterior–posterior: por encima del mesencéfalo, anterior significa «hacia la parte frontal del cerebro» y posterior, «hacia la parte trasera del cerebro». A nivel del mesencéfalo y debajo de este, anterior significa «hacia la porción ventral del cuerpo» y posterior, «hacia la porción dorsal del cuerpo».

Superior–inferior: en general, superior significa «en dirección al cerebro» e inferior, «en dirección al cordón espinal».

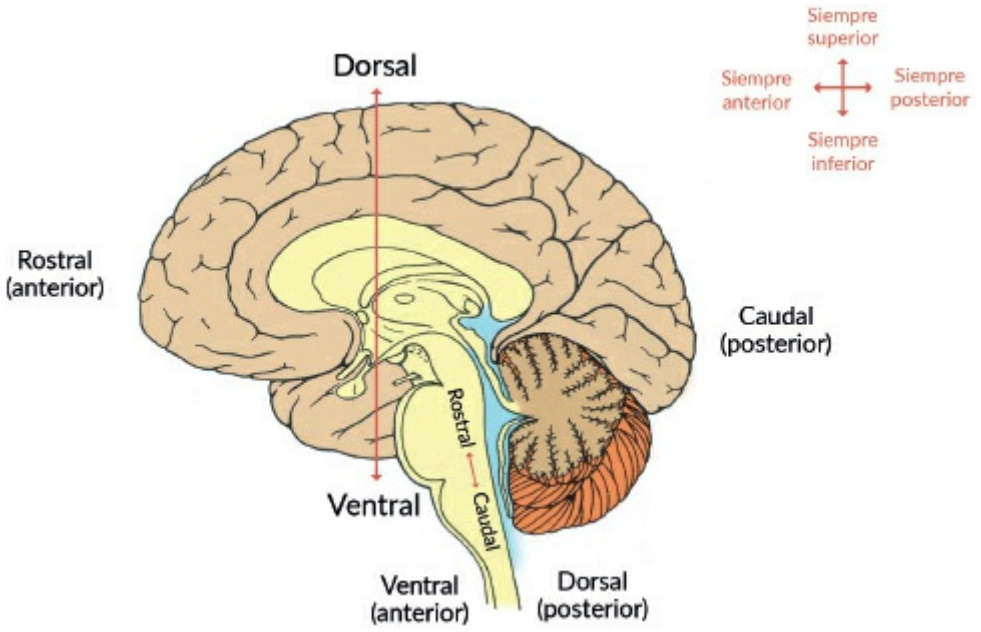


Figura 1.4. Términos para indicar orientación en el SNC.

Planos de orientación

Cuando se estudia el sistema nervioso desde una perspectiva anatómica, patológica o en imágenes diagnósticas, generalmente se utilizan tres tipos de cortes ortogonales (figura 1.5):

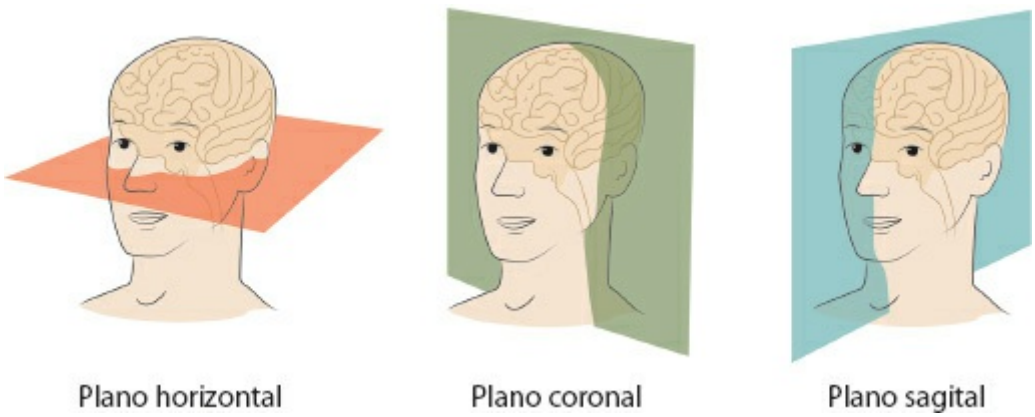


Figura 1.5. Disposición de los tres planos de referencia anatómica.

Horizontal: también conocido como axial o transversal, es paralelo al piso o perpendicular al eje longitudinal del cuerpo.
Coronal: también denominado frontal, es un corte paralelo al eje longitudinal del cuerpo y perpendicular al sagital que pasa a nivel de los pabellones auriculares.
Sagital: también llamado corte medial, divide el encéfalo en dos mitades iguales y cursa a través de la línea media. Aquellos que son paralelos al plano sagital se denominan planos parasagitales.

Otros términos de uso común

Ipsolateral: en el mismo lado de un punto específico.
Contralateral: al lado opuesto de un punto específico.
Comisura: grupo de fibras que conectan lados opuestos del encéfalo.
Núcleo: grupo (cuerpo) de neuronas localizado en una región específica del encéfalo o del cordón espinal, que recibe información de las mismas fuentes, proyecta sus axones a regiones similares y comparte funciones con otros núcleos.
Decusación: cruce de fibras nerviosas en forma de X.
Tracto: grupo de fibras nerviosas que poseen la misma función. Se conoce también como fascículo.
Proximal: que se encuentra cerca del SNC o de un punto de referencia.
Distal: que se encuentra lejos del SNC o de un punto de referencia.

INTRODUCCIÓN A LA HISTOLOGÍA DEL SISTEMA NERVIOSO

El sistema nervioso está compuesto por dos tipos principales de células: las células nerviosas (neuronas) y las células gliales (glía). Ambas comparten muchas características de las células comunes; pero las neuronas poseen la habilidad de comunicarse en forma precisa y rápida con otras células distantes. Además de estos dos, en la actualidad se reconocen otros tipos de células indispensables para el adecuado funcionamiento del sistema nervioso: las células endoteliales, las células inmunes y las células madre.

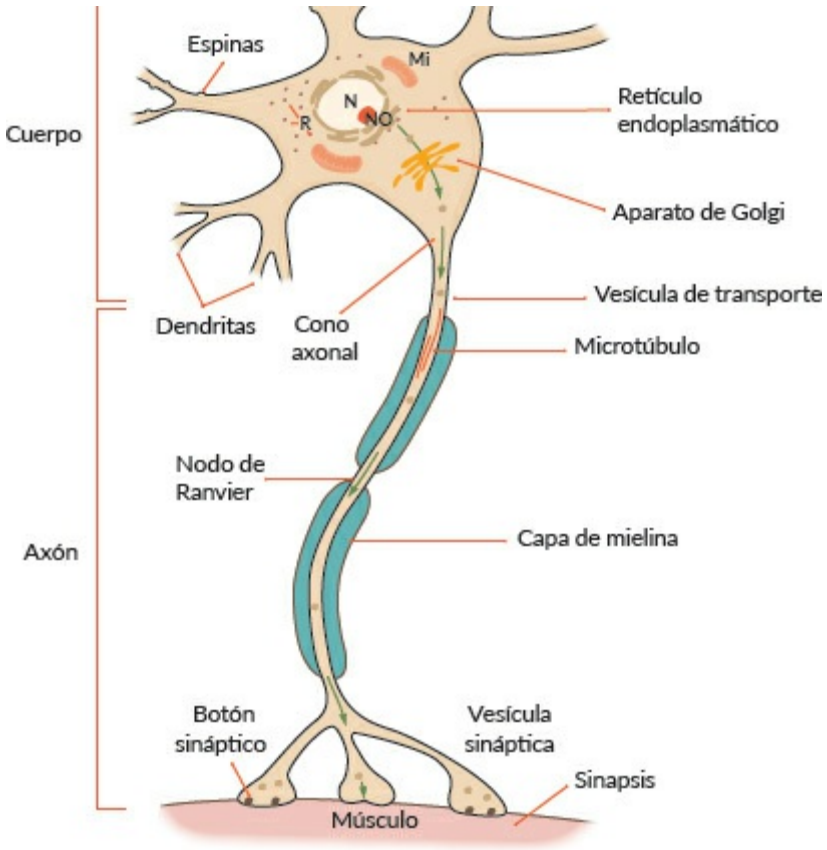


Figura 1.6. Partes de la neurona y sinapsis entre el axón y el músculo. Mi: mitocondria; N: núcleo; NO: nucléolo; R: ribosomas.

Neuronas

Las neuronas son células efectoras que transportan información mediante impulsos eléctricos (entre las partes de la neurona) e impulsos químicos (entre diferentes neuronas). La glía también participa en esta actividad. Todas las neuronas poseen: a) un cuerpo (soma o pericarion), que contiene el núcleo, b) prolongaciones cortas denominadas dendritas, que reciben la mayoría de los impulsos provenientes de otras neuronas a través de uniones que se denominan sinapsis, y c) una prolongación denominada axón, que conduce la información originada en la neurona. Los axones tienen ramas terminales que forman sinapsis con las dendritas de otras neuronas o con células efectoras como las musculares y glandulares (figura 1.6).

El cuerpo de la neurona contiene el núcleo —con su nucléolo— y otros organelos citoplasmáticos tales como las mitocondrias, el retículo endoplasmático rugoso, los ribosomas libres, el aparato de Golgi y los elementos del citoesqueleto. En el cuerpo se sintetizan todas las enzimas de la neurona, las proteínas estructurales, los componentes de la membrana celular y de los organelos, y algunos mensajeros químicos. Los ribosomas se tiñen intensamente con colorantes básicos formando masas denominadas cuerpos de Nissl.

El citoesqueleto de las neuronas está formado por microtúbulos, neurofilamentos y microfilamentos, que contribuyen a mantener la forma de la neurona. Los microtúbulos son cilindros compuestos por polímeros de una proteína llamada tubulina y sirven como sustrato para transportar organelos a través de los axones (figura 1.7). Los neurofilamentos —especialmente abundantes en el axón— están formados por complejos de proteínas que al unirse forman lazos. Los microfilamentos son los elementos más pequeños del citoesqueleto y contienen filamentos de actina. Son necesarios para fijar las moléculas de membrana en su lugar —p. ej., las moléculas de los receptores en las sinapsis— y para permitir el movimiento de la porción distal del axón (cono de crecimiento axonal).

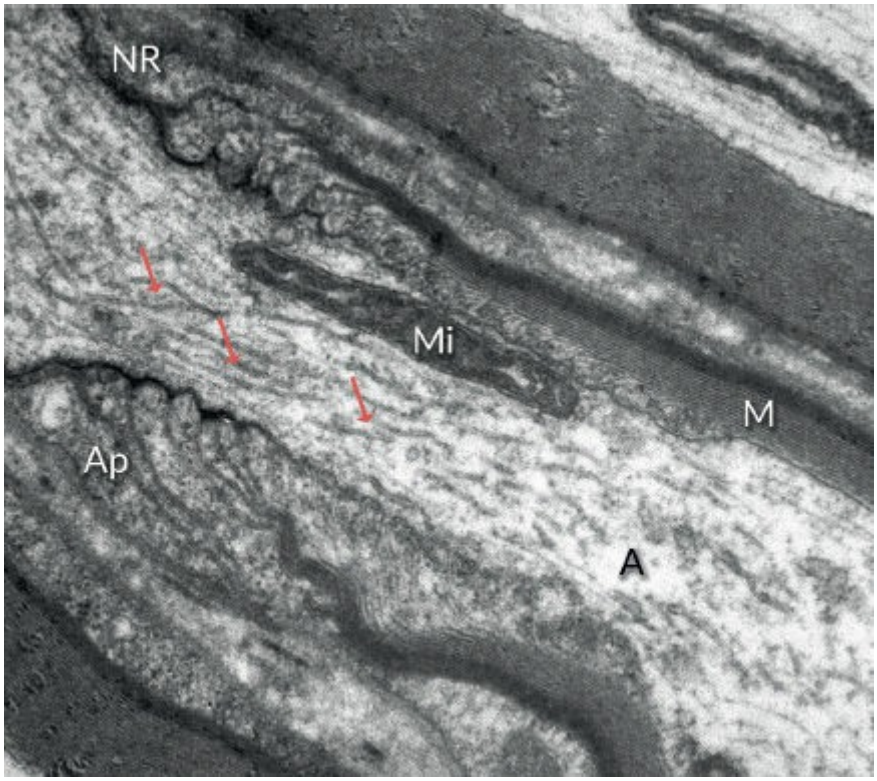


Figura 1.7. Micrografía electrónica de nervio ciático de ratón. Se observa un axón (A), rodeado por la capa de mielina (M). Al interior del axón son evidentes algunas mitocondrias (Mi) y abundantes microtúbulos (►). La capa de mielina se ancla a la membrana axonal por medio de las asas paranodales (Ap) —formando el paranodo— y deja descubierta una región denominada nodo de Ranvier (NR).

Fuente: cortesía de la Dra. Lori Isom, Departamento de Farmacología, Universidad de Michigan.

Las dendritas tienen una constitución citoplasmática similar a la del cuerpo de la neurona. Algunas de ellas presentan pequeñas protuberancias denominadas espinas, donde se llevan a cabo los contactos sinápticos. El axón es una prolongación cilíndrica que se origina en el cuerpo de la neurona, a partir del cono axonal. Contiene microtúbulos acompañados por neurofilamentos y mitocondrias (figuras 1.6 y 1.7). La membrana del axón se denomina axolema y el citoplasma que contiene, axoplasma. En la porción distal, el axón se ramifica extensamente en estructuras denominadas

terminales sinápticas.

A través del axón, varios organelos y productos sintetizados en el soma deben ser transportados para cumplir su función; este proceso activo se llama transporte axonal. Se denomina anterógrado cuando la carga se aleja del cuerpo de la neurona y retrógrado cuando se dirige a este. Según su velocidad, el transporte axonal también se clasifica en lento y rápido. Este último se realiza a través de los microtúbulos con la intervención de dos ATPasas: la kinesina y la dineína.

Más allá del cono axonal, el axón está recubierto por una membrana de células gliales especializadas que forman capas lipídicas denominadas capas de mielina. La mielina aumenta la velocidad de propagación de las señales eléctricas (potenciales de acción) que las neuronas usan para transmitir información. Las células gliales encargadas de formar la mielina en el SNC son los oligodendrocitos, y en el SNP son las células de Schwann.

Por lo general, se requieren múltiples células mielinizantes para cubrir la longitud total de un axón, ya que una de ellas puede cubrir solamente un segmento. Entre la porción cubierta por células mielinizantes contiguas existe una área axonal sin recubrimiento de mielina llamada nodo de Ranvier (figuras 1.6 y 1.7). La porción mielinizada del axón entre dos nodos de Ranvier se denomina internodo.

Con base en la morfología del cuerpo, las dendritas y el axón, las neuronas pueden clasificarse según sus diferentes formas y tamaños (figura 1.8). En los mamíferos, la mayoría de las neuronas son multipolares; es decir, tienen un cuerpo del que se desprenden múltiples dendritas y un axón que puede recorrer distancias considerables y producir ramificaciones que alcanzan diferentes objetivos.

Existen otras neuronas denominadas bipolares, que tienen una sola dendrita y un único axón que surge del cuerpo de la neurona. Las neuronas bipolares suelen ser sensitivas, como las que participan en la vía visual u olfatoria. Algunas neuronas bipolares se denominan pseudomonopolares, ya que sus procesos están originalmente fusionados y luego se separan para formar dos axones. De este tipo son las neuronas ganglionares sensitivas. También existen neuronas monopolares o unipolares, que son poco frecuentes en los vertebrados.

Las neuronas también pueden catalogarse en: principales, de proyección o Golgi tipo i — que poseen un axón largo y forman tractos o fascículos largos en el encéfalo y en el cordón espinal—, e intrínsecas o Golgi tipo ii —que poseen un axón muy corto y abundan en las cortezas cerebral y cerebelosa. Estas últimas son interneuronas y se considera que poseen una función inhibitoria.

Las neuronas se estimulan mediante impulsos eléctricos o químicos. En reposo, tienen una carga negativa dentro de su membrana celular. Esta membrana contiene proteínas especializadas que facilitan el flujo de iones

inorgánicos. Esto crea corrientes eléctricas que dan al interior de la neurona una carga positiva o más negativa, dependiendo del ion y la dirección del flujo.

Estas proteínas especializadas se denominan canales iónicos voltaje–dependientes. Los canales se abren o cierran en respuesta a cambios de voltaje en la membrana o en los receptores, los cuales reaccionan ante la presencia de un ligando. Las dendritas y el soma de una neurona reciben información de múltiples células en forma de ligandos o corrientes eléctricas. Si la combinación de esas señales logra llevar el potencial de membrana a valores altamente positivos (depolarización), los canales iónicos concentrados en el cono axonal generan una corriente denominada potencial de acción, la cual se propaga a través del axón hasta las terminales sinápticas usando los canales iónicos que se encuentran a lo largo del axolema. El potencial de acción tiene una duración promedio de un milisegundo y se transmite a velocidades cercanas a 60 m/s. En axones mielinizados, los canales iónicos que intervienen en la propagación del potencial de acción se encuentran solamente en los nodos de Ranvier. En estos casos, la propagación ocurre de nodo a nodo (conducción saltatoria) y es más rápida que la conducción en axones no mielinizados. Al llegar a las terminales sinápticas, el potencial de acción desencadena la liberación de neurotransmisores y neuropéptidos desde las vesículas sinápticas presentes en la terminal axonal.

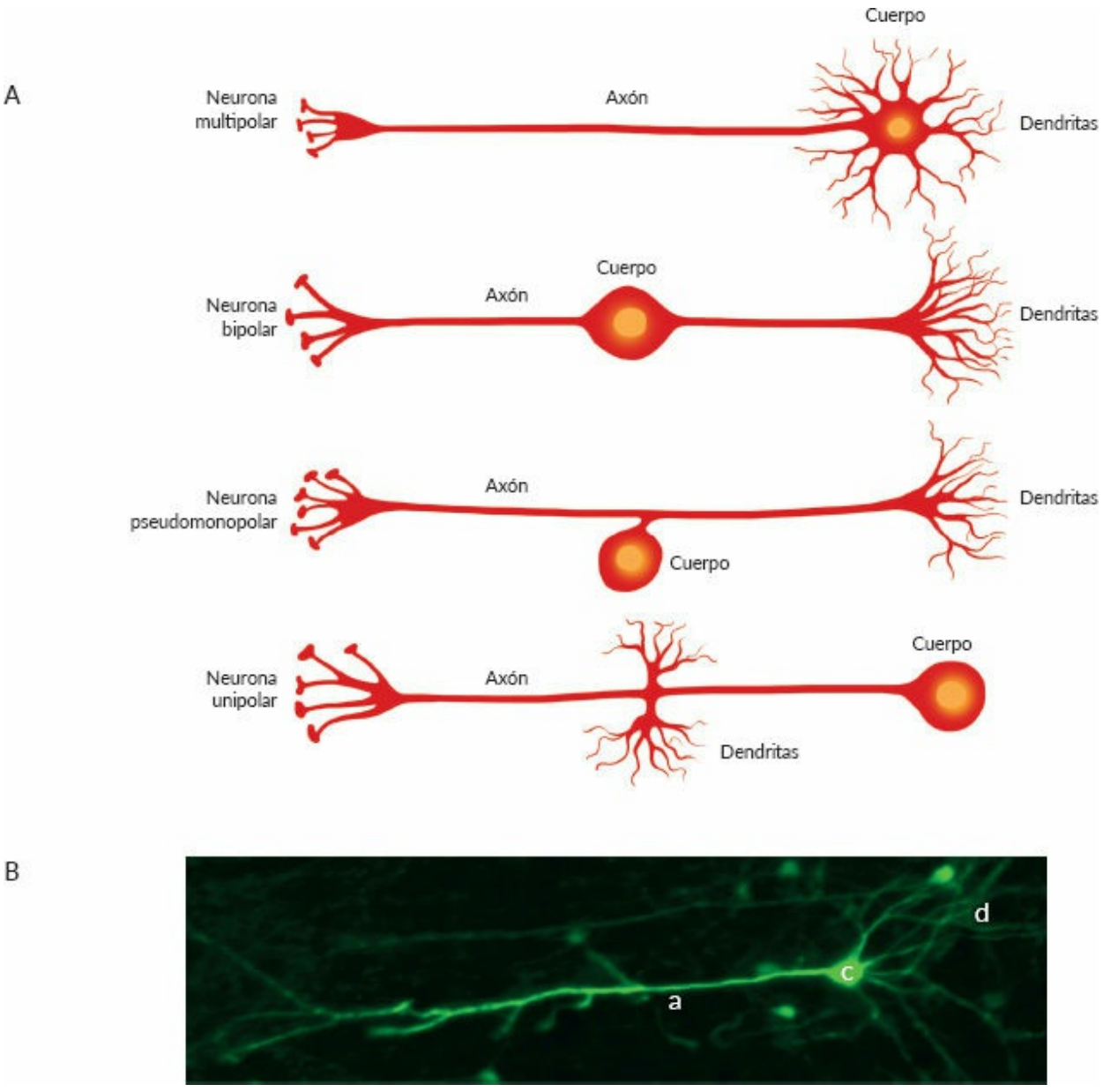


Figura 1.8A. Clasificación de neuronas según su morfología.

Figura 1.8B. Neurona piramidal (multipolar) de la formación hipocampal del ratón. Presenta un fluoróforo verde que permite su visualización usando un microscopio fluorescente. Se observa el cuerpo celular (c), múltiples dendritas cortas (d) y un axón (a) de gran extensión comparado con las dendritas.

Fuente: cortesía del Dr. José Esteban, Centro de Biología Molecular Severo Ochoa, Universidad Autónoma de Madrid.

La comunicación química entre las neuronas se realiza mediante uniones especiales denominadas sinapsis. En las sinapsis, la información de la terminal axonal de una neurona (neurona presináptica) es transportada a las dendritas (espina sináptica) o soma de la siguiente (neurona postsináptica) en forma de neurotransmisores. Entre las dos membranas neuronales hay un espacio denominado hendidura sináptica (figura 1.9). Para proteger y modular su función, un tipo de célula glial llamada astrocito envuelve la sinapsis. También existen sinapsis axo–axonales y dendro–dendríticas.

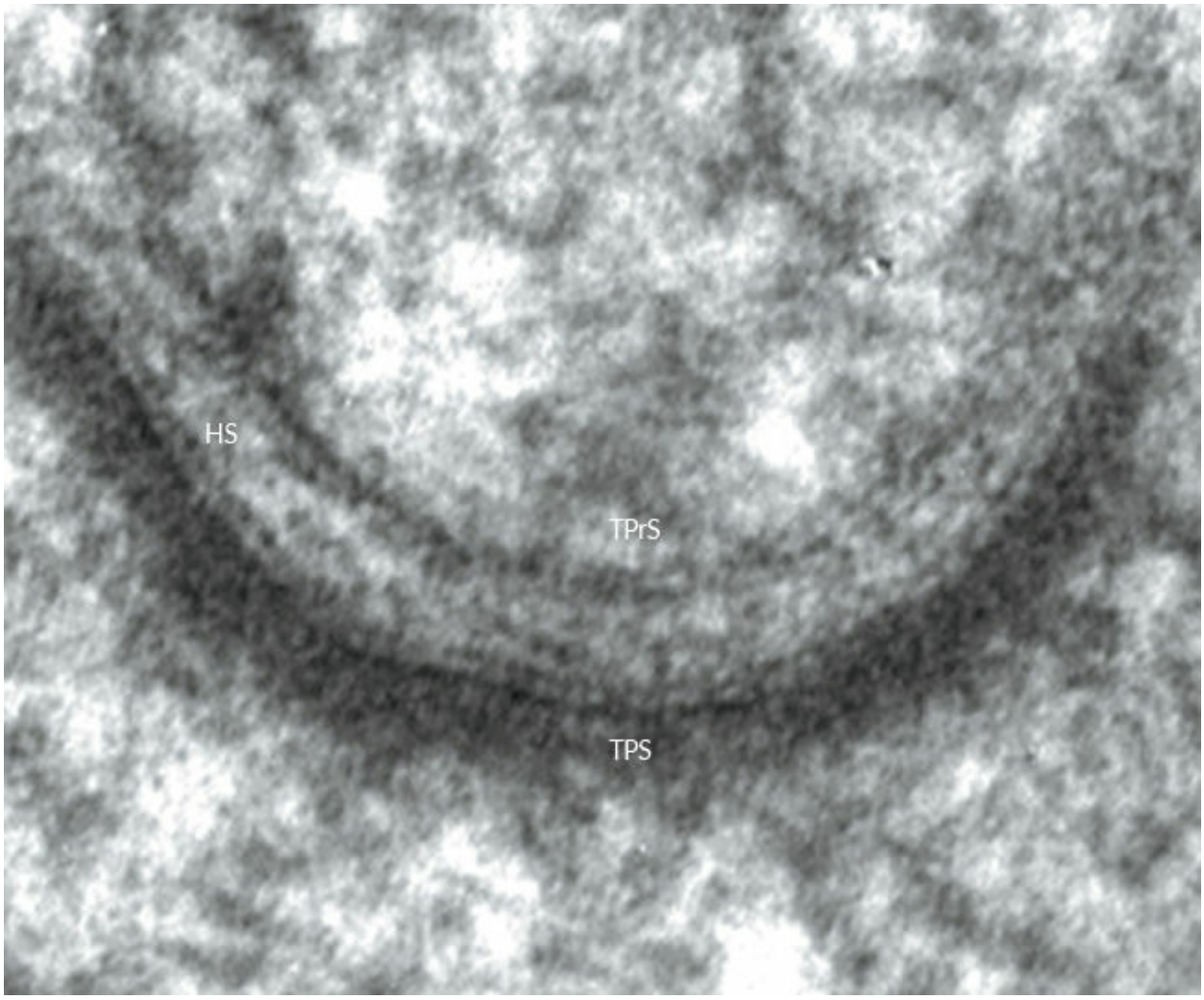


Figura 1.9. Micrografía electrónica de una sinapsis. TPrS: terminal presináptica; HS: hendidura sináptica; TPS: terminal postsináptica.
Fuente: cortesía del Dr. José Esteban, Departamento de Farmacología, Universidad de Michigan.

En general, los neurotransmisores tienen dos tipos de funciones. La primera es la comunicación rápida entre las neuronas, mediante eventos excitatorios o inhibitorios conocidos como potenciales postsinápticos excitatorios (PPSE) o potenciales postsinápticos inhibitorios (PPSI). La segunda función es la neuromodulación, que incluye un amplio rango de mecanismos celulares tales como la transmisión sináptica y el crecimiento neuronal. La neuromodulación puede facilitar o inhibir la actividad neuronal subsecuente.

En el SNC, el neurotransmisor excitador más común es el glutamato y el inhibidor más común es el ácido gamma–aminobutírico (gaba). En el SNP, la acetilcolina es el principal neurotransmisor en la unión neuromuscular. Tanto la acetilcolina como la norepinefrina son los neurotransmisores más comunes en el sistema nervioso autónomo.

La mayor parte del SNC se puede dividir en sustancia blanca y sustancia gris. La sustancia blanca está constituida por axones mielinizados y la sustancia gris por los cuerpos neuronales, las dendritas y el cono axonal. La mayoría de las conexiones sinápticas ocurren en la sustancia gris, mientras

que en la sustancia blanca, los axones transmiten impulsos a distancias considerables.

La superficie de los hemisferios del cerebro y el cerebelo —incluyendo el vermis— está cubierta por un manto de sustancia gris que se conoce como corteza cerebral o cerebelosa, la cual está más desarrollada en los mamíferos superiores. Al interior de la corteza se encuentra la sustancia blanca, la cual contiene los axones que llevan y traen información de la corteza cerebral, corteza cerebelosa y otras regiones del SNC. Dentro de la sustancia blanca se forman grandes agrupaciones de neuronas llamadas núcleos. Por ejemplo, los grupos neuronales que se localizan dentro de los hemisferios cerebrales se denominan núcleos basales o, más comúnmente, ganglios basales. En el cerebelo y tronco cerebral también se encuentran diferentes núcleos (figura 1.10).

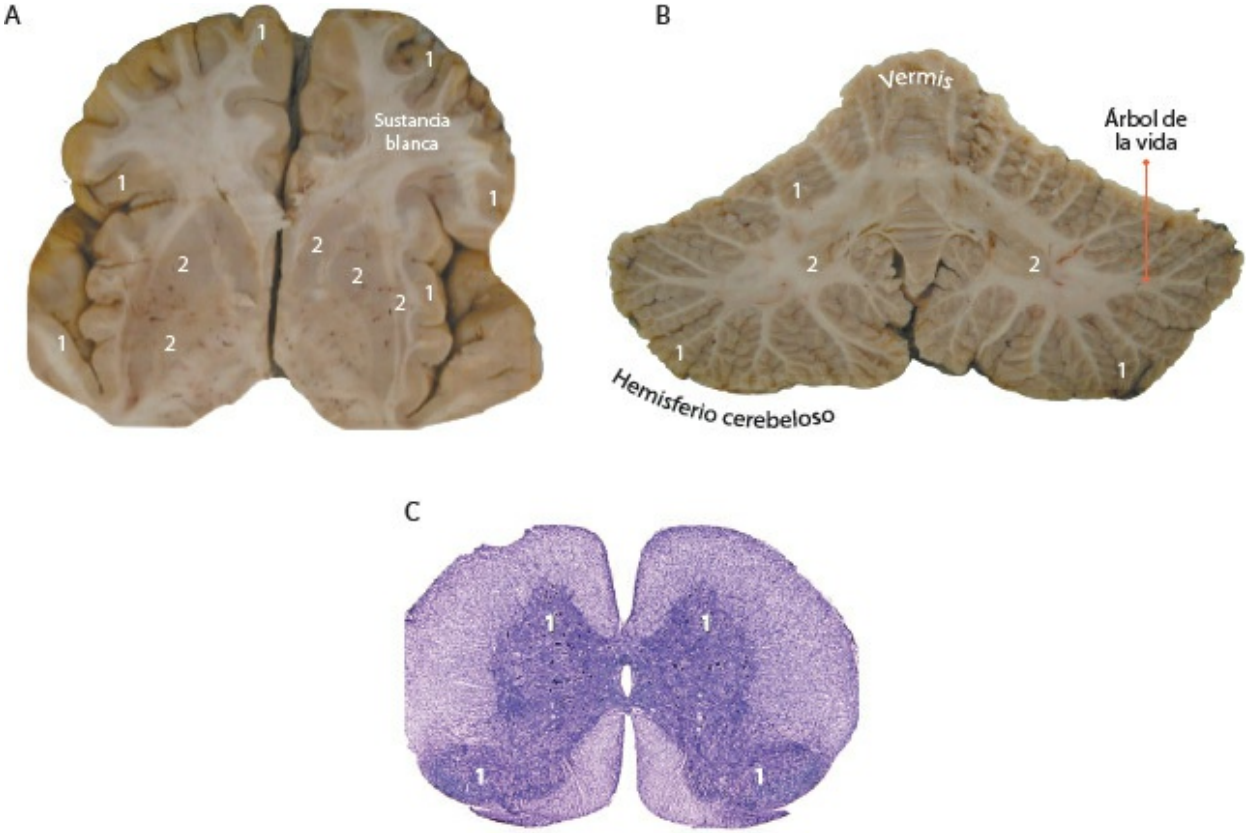


Figura 1.10A. Corte horizontal de los hemisferios cerebrales. 1: corteza cerebral; 2: núcleos basales.

Figura 1.10B. Corte coronal del cerebelo. 1: corteza cerebelosa; 2: núcleos cerebelosos. La sustancia blanca forma el denominado árbol de la vida.

Figura 1.10C. Corte histológico transversal del cordón espinal de un roedor, a nivel lumbar, con coloración argéntica–PAS. Se distingue la sustancia gris con sus prolongaciones o astas (1), rodeada por la sustancia blanca, formada por grupos de fascículos o tractos.

Fuente: cortesía del Dr. Pedro Franco, Departamento de Morfología, Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia.

Los axones que forman la sustancia blanca en el SNC se agrupan de acuerdo a su función bajo diferentes nombres: fascículos, lemniscos, haces o

tractos. En general, los fascículos se denominan con una palabra compuesta. La primera parte indica donde se localizan los cuerpos neuronales y los axones que forman el fascículo; la segunda se refiere al sitio donde los axones forman sinapsis. Por ejemplo, el fascículo corticoespinal se origina en la corteza cerebral y termina en el cordón espinal.

En el cordón espinal, la distribución de las sustancias gris y blanca es opuesta a la de los hemisferios cerebrales; es decir, la sustancia gris reposa en el centro y la sustancia blanca, a su alrededor. Los tractos que forman la sustancia blanca se pueden clasificar en ascendentes y descendentes. En el tronco cerebral, las sustancias gris y blanca se encuentran mezcladas; es decir, se puede identificar sustancia blanca tanto en la periferia como en el centro, e igual ocurre con la sustancia gris, que forma núcleos específicos.

Glía en el sistema nervioso central

La palabra glía proviene del término griego para pegante. Se denominó así porque en principio se describió como el tejido encargado de sostener y llenar los espacios entre las neuronas. Las células gliales son más numerosas que las neuronas y no propagan potenciales de acción. Mantienen el medio ambiente tisular para garantizar un adecuado funcionamiento neuronal y proveen soporte a las neuronas. En el SNC, la glía contiene diferentes tipos de células que se describen a continuación:

Oligodendrocitos: del griego oligodendro, que significa «árbol con pocas ramas», se encargan de formar las capas de mielina que cubren los axones. Tanto en el SNC como en el SNP, los axones están revestidos por capas gruesas de mielina y contienen amplios internodos. Un oligodendrocito puede recubrir —es decir, formar internodos en— múltiples axones. Debido a su papel como formadores de mielina, se encuentran principalmente en la sustancia blanca; aunque también proveen capas de mielina para axones que atraviesan la sustancia gris.

Astrocitos: denominados así por su forma de estrella, son el segundo grupo de células más abundante en la glía. Los astrocitos poseen un citoesqueleto bien desarrollado que contiene microtúbulos y filamentos de actina, los cuales son necesarios para llevar a cabo la función de soporte. Se distinguen dos tipos de astrocitos adultos: los protoplasmáticos, que se localizan en la sustancia gris, y los fibrosos, ubicados en la sustancia blanca. Los astrocitos protoplasmáticos poseen prolongaciones que se ramifican profusamente y terminan en expansiones denominadas pies terminales, que hacen contacto con los cuerpos neuronales, las dendritas, la piamadre y los capilares. De ahí que los astrocitos protoplasmáticos estén implicados en la regulación de la concentración iónica extracelular y en la transferencia de metabolitos desde y hacia las neuronas. Asimismo,

por su cercanía con los capilares, constituyen uno de los elementos de la barrera hematoencefálica (figura 1.11). Los astrocitos fibrosos se localizan en la sustancia blanca y cumplen la función de reparar el tejido lesionado.

Células ependimarias: o ependimoglía, se clasifican en ependimocitos, tanicitos y células coroideas. Los ependimocitos, que poseen microvellosidades y cilias, tapizan las cavidades ventriculares. Los tanicitos se encuentran en el piso del tercer ventrículo y sus procesos se extienden hacia el tejido nervioso, donde se yuxtaponen a los capilares y las neuronas. Las células coroideas son ependimocitos modificados que se sitúan en los plexos coroideos y están involucrados en la producción y secreción del líquido cefalorraquídeo que llena los ventrículos y ocupa el espacio subaracnoideo.

Microglía: llamada así por componerse de células más pequeñas que los oligodendrocitos y los astrocitos, juega un papel fundamental en la respuesta del sistema nervioso al daño. Migran al sitio afectado, proliferan y se transforman en macrófagos. La tabla 1.1 resume algunas características de las células descritas hasta el momento.

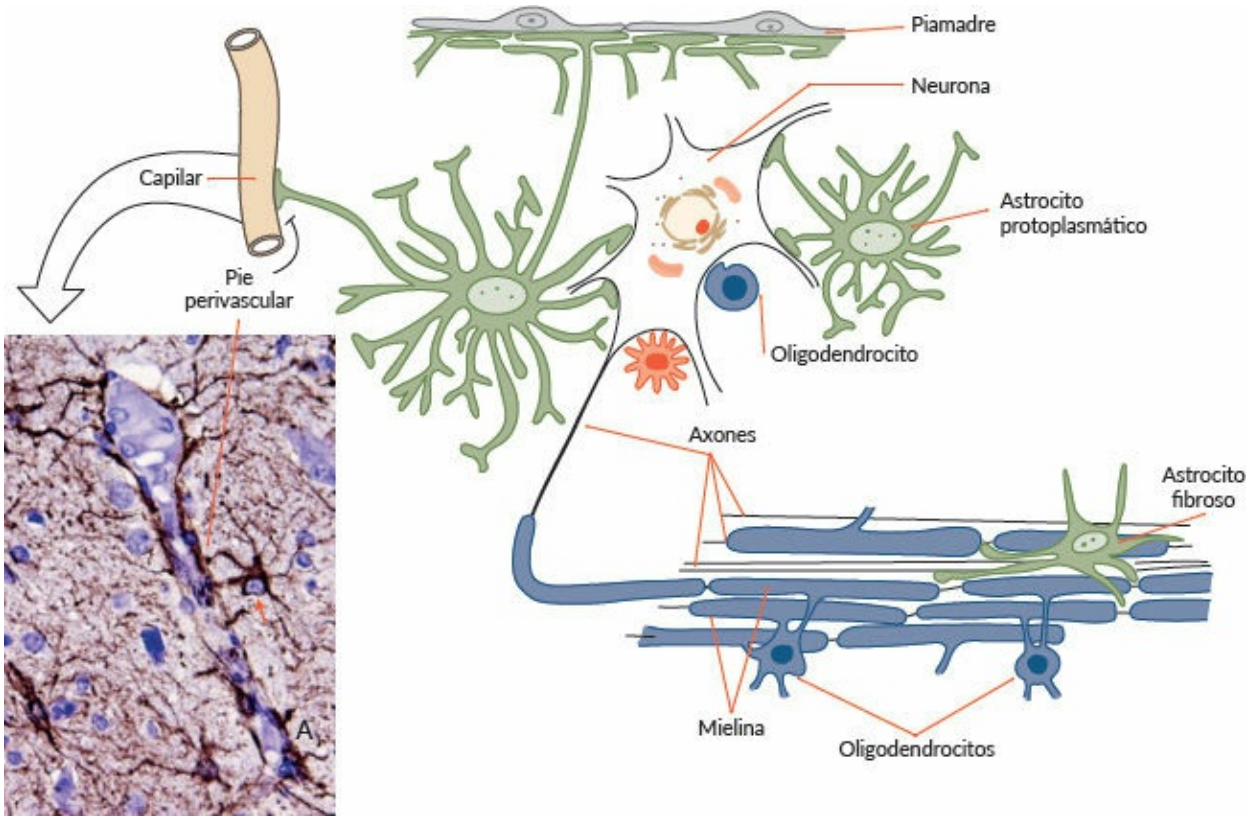


Figura 1.11. Relaciones de las células gliales con las neuronas, los vasos sanguíneos (capilares) y la piamadre. A: Pieza histológica con coloración de inmunohistoquímica para proteína glial fibrilar, en la que se aprecian astrocitos (►) con múltiples prolongaciones citoplasmáticas ramificadas profusamente.

Fuente: pieza histológica cortesía del Dr. Pedro Franco, Departamento de Morfología, Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia.

Tabla 1.1. Tipos de células del sistema nervioso central.

Célula o parte de la célula	Localización principal	Función principal
Cuerpo y dendritas de la neurona	Sustancia gris	Integrar información, sintetizar macromoléculas, sinapsis
Axones	Sustancia blanca	Conducir información
Oligodendrocitos	Sustancia blanca y gris	Formar capa de mielina
Astrocitos protoplasmáticos	Sustancia gris	Dar soporte mecánico y metabólico
Astrocitos fibrosos	Sustancia blanca	Dar soporte mecánico y metabólico
Ependimoglía	Paredes de los ventrículos	Tapizar los ventrículos, formar plexos coroideos
Microglía	Sustancia gris y blanca	Responder al daño, fagocitosis

Glía en el sistema nervioso periférico

En el SNP, los axones se agrupan para formar los nervios periféricos y las neuronas están, en su mayoría, recubiertas por procesos de células gliales. La función de estos procesos es proveer soporte metabólico y aislamiento eléctrico. La mayor parte de las células gliales a nivel periférico son variantes de las células de Schwann. Si bien algunas células de Schwann se convierten en células satélite que rodean los cuerpos neuronales en los ganglios de los nervios periféricos, la mayoría de estas forman la mielina (figura 1.12).

Los nervios periféricos pueden ser mielinizados, pero a diferencia de los nervios del SNC, una célula de Schwann forma un internodo en un solo axón. La mayoría de los axones pequeños en los nervios periféricos no están recubiertos por capas de mielina. Estos axones forman grupos de docenas que son recubiertos por una célula de Schwann. La escasa mielina y el diámetro pequeño causan que la conducción de los estímulos eléctricos sea más lenta. Si bien la función principal de las células de Schwann es formar mielina, también se ven implicadas en el crecimiento axonal tras lesiones del nervio.

En el SNP, la información que se transporta desde una región hacia una estructura se denomina aferente y la que hace el recorrido opuesto se denomina eferente. Así pues, los nervios periféricos aferentes llevan información del medio ambiente hacia el SNC y los nervios eferentes llevan información motora desde el SNC hacia la periferia.

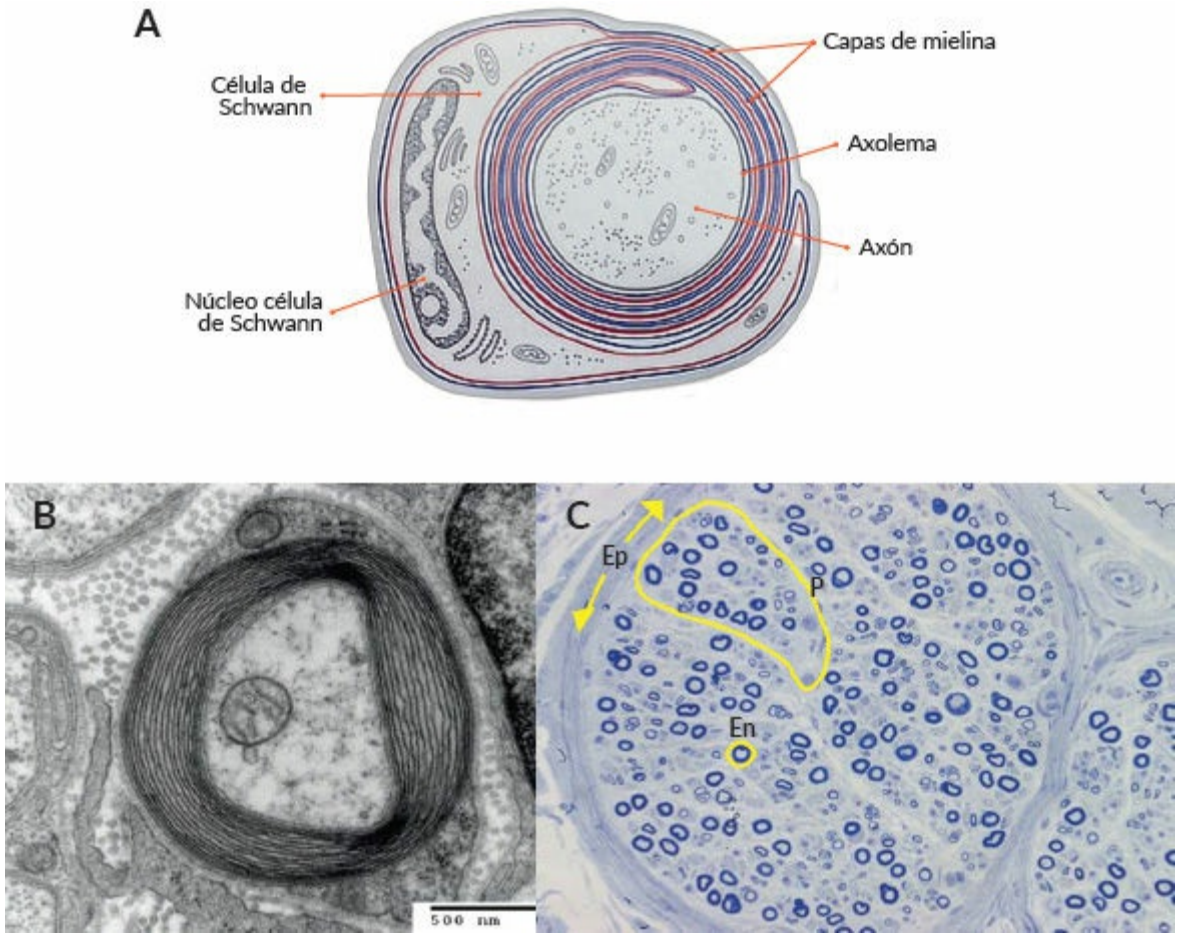


Figura 1.12A. Esquema de fibra mielinizada en la que se aprecia el axón, las capas de mielina a su alrededor y el núcleo de la célula de Schwann. **Fuente:** adaptada de (4).

Figura 1.12B. Imagen por microscopía electrónica en la que se aprecian las mismas estructuras señaladas en la figura anterior.

Figura 1.12C. Tinción de nervio sural humano a bajo aumento. Se observa el tejido conectivo del epineurio (Ep), las fibras concéntricas del perineurio (P) delimitando un fascículo. Los múltiples axones mielinizados se encuentran rodeados por el endoneurio (En). **Fuente:** cortesía de la Dra. Eva Feldman, Departamento de Neurología, Universidad de Michigan.

INTRODUCCIÓN A LA NEUROANATOMÍA

Para entender las funciones de las estructuras del sistema nervioso, es preciso identificarlas primero y conocer su relación con otras. Las múltiples estructuras del encéfalo y del cordón espinal pueden parecer confusas. Por tal razón, en principio se hará una introducción general para familiarizar al lector con cada una de ellas y, en capítulos posteriores, se hará una descripción más detallada.

Como se habrá notado anteriormente, la terminología neuroanatómica se deriva del latín y el griego. Así, la palabra encéfalo proviene del griego que significa «en la cabeza», y está constituido por el cerebro, el cerebelo y el tronco cerebral. El término diencéfalo significa «entre el cerebro», y denota las estructuras que se localizan entre los hemisferios cerebrales.

Cerebro

El cerebro está constituido por dos hemisferios y un grupo de estructuras entre ellos denominadas estructuras interhemisféricas o diencéfalo. Ambos hemisferios están separados por el surco interhemisférico. En la parte inferior del surco se encuentra la cara superior del cuerpo calloso, que está formado por millones de fibras nerviosas (axones recubiertos de mielina) que nacen en una región específica de un hemisferio y terminan en una región homóloga del hemisferio opuesto. En cada hemisferio se describen tres caras: lateral, medial e inferior. En la superficie de las caras se observan los surcos y, entre estos, las circunvoluciones, también llamadas giros o lobulillos (figura 1.13).

En una vista lateral se puede distinguir el polo anterior o frontal (PF), el polo posterior u occipital (PO) y el polo lateral o temporal (PT). Desde esta perspectiva, se pueden identificar los surcos (o fisuras) que delimitan los giros o circunvoluciones de cada lóbulo. En la figura 1.14, se reconocen los lóbulos frontal, parietal, temporal y una pequeña parte del occipital.

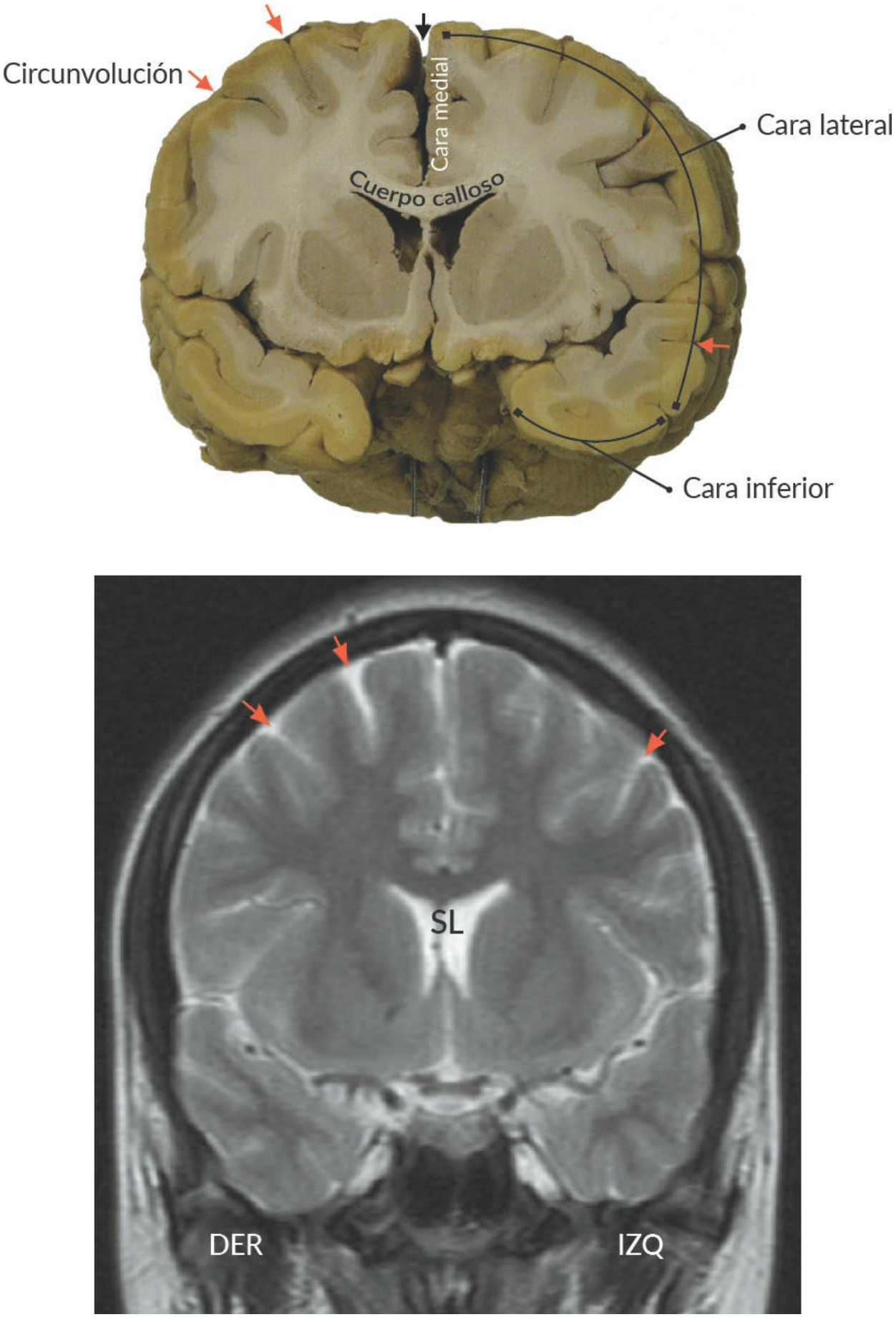


Figura 1.13A. Corte coronal del encéfalo. Se aprecian las caras lateral, medial e inferior de los

hemisferios cerebrales, el surco interhemisférico (►), cuyo piso está formado por el cuerpo calloso, las circunvoluciones y los surcos (►). Dentro de los hemisferios, se observa la corteza cerebral, los núcleos basales, la sustancia blanca y las cavidades de los hemisferios o ventrículos laterales.
Figura 1.13B. Imagen por resonancia magnética (IRM) en secuencia T2 (T2–WI) de corte coronal del encéfalo. Se observan las mismas estructuras señaladas en la figura anterior. Nótese que las cavidades ventriculares contienen LCR (de color blanco) y están separadas por un tabique, el septum lúcido (SL). Los surcos (►) también contienen LCR. DER: lado derecho de la persona; IZQ: lado izquierdo de la persona.

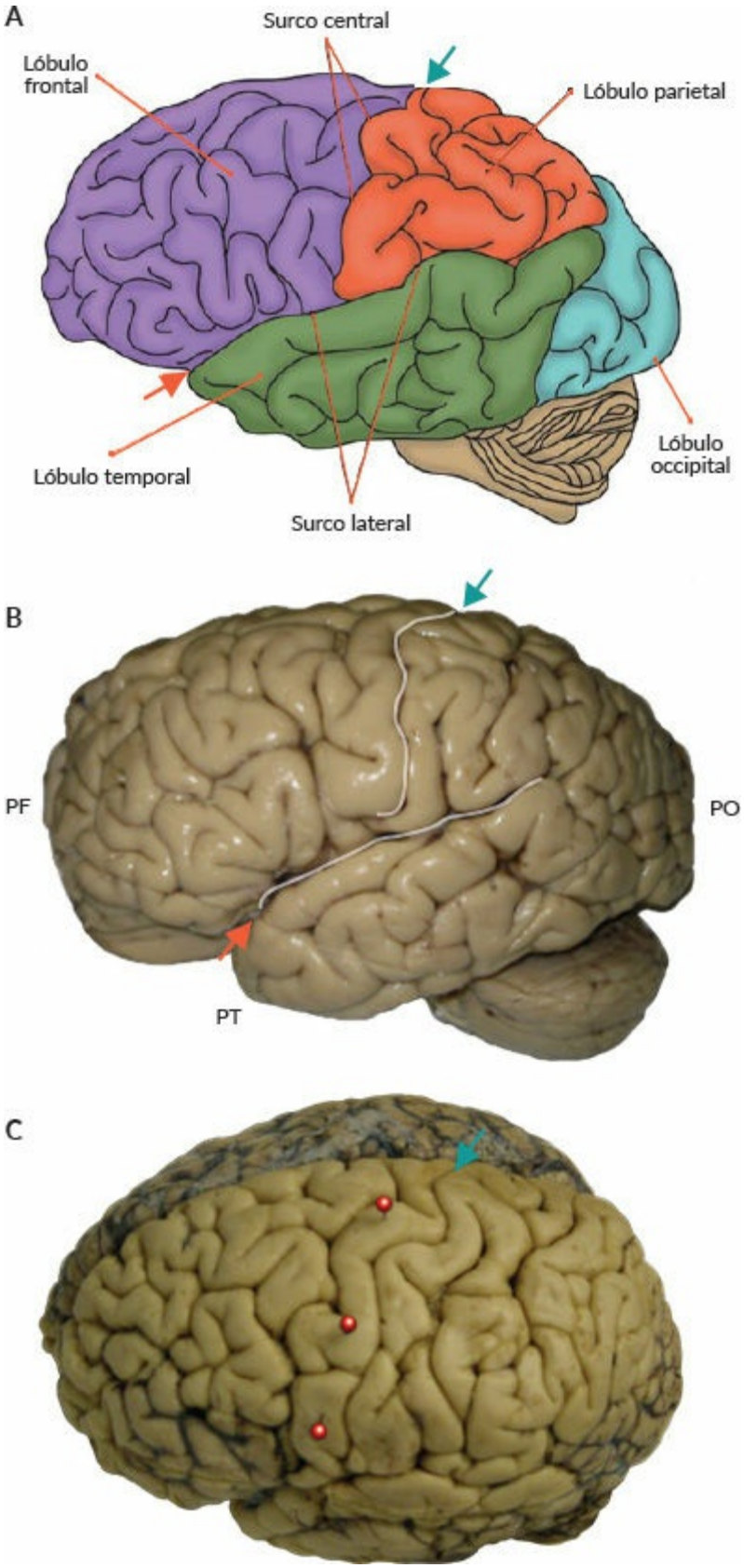


Figura 1.14A. Esquema de la cara lateral del cerebro.

Figura 1.14B. Pieza anatómica con vista lateral de un hemisferio cerebral. PO: polo occipital; PF: polo frontal; PT: polo temporal ►: surco o fisura central (también llamada cisura de Rolando); ►: surco lateral (cisura de Silvio).

Figura 1.14C. Pieza anatómica con vista lateral de un hemisferio cerebral. Alfileres: circunvolución o giro precentral; ►: surco o fisura central. La porción del hemisferio a la izquierda de este surco

corresponde al lóbulo frontal, la porción a la derecha del surco es el lóbulo parietal.

Para resaltar la importancia de estas divisiones, se puede analizar el giro precentral (señalado por los alfileres en la figura 1.14C), también conocido como corteza motora primaria, ya que controla la actividad motora del hemicuerpo contralateral (del lado opuesto). Las neuronas de este giro están organizadas somatotópicamente; es decir, áreas específicas del giro están asociadas con áreas específicas del cuerpo, tanto anatómica como funcionalmente. Por ejemplo, la región del giro cercana al surco lateral está asociada con el control voluntario de los movimientos de la cara y la cabeza.

En una vista inferior del cerebro también se pueden identificar los polos, el surco interhemisférico y el surco lateral que se observaron en la cara lateral. Delante del surco lateral se encuentra la cara inferior del lóbulo frontal, que se conoce como lóbulo orbitario o región orbitofrontal (ROF). En la zona medial de la cara inferior del lóbulo frontal se aprecia el giro recto, y junto a este se localizan el bulbo y la cintilla olfatoria. Asimismo, se observa que las circunvoluciones del lóbulo temporal se prolongan al lóbulo occipital, razón por la cual esta región también se conoce como lóbulo temporo–occipital (TO). Estas circunvoluciones son el giro temporo–occipital interno (T5), el medio (T4) y el lateral (T3). El giro T5 se ensancha adelante formando el uncus del hipocampo y continúa hacia atrás bajo el nombre de giro parahipocampal (GPH).

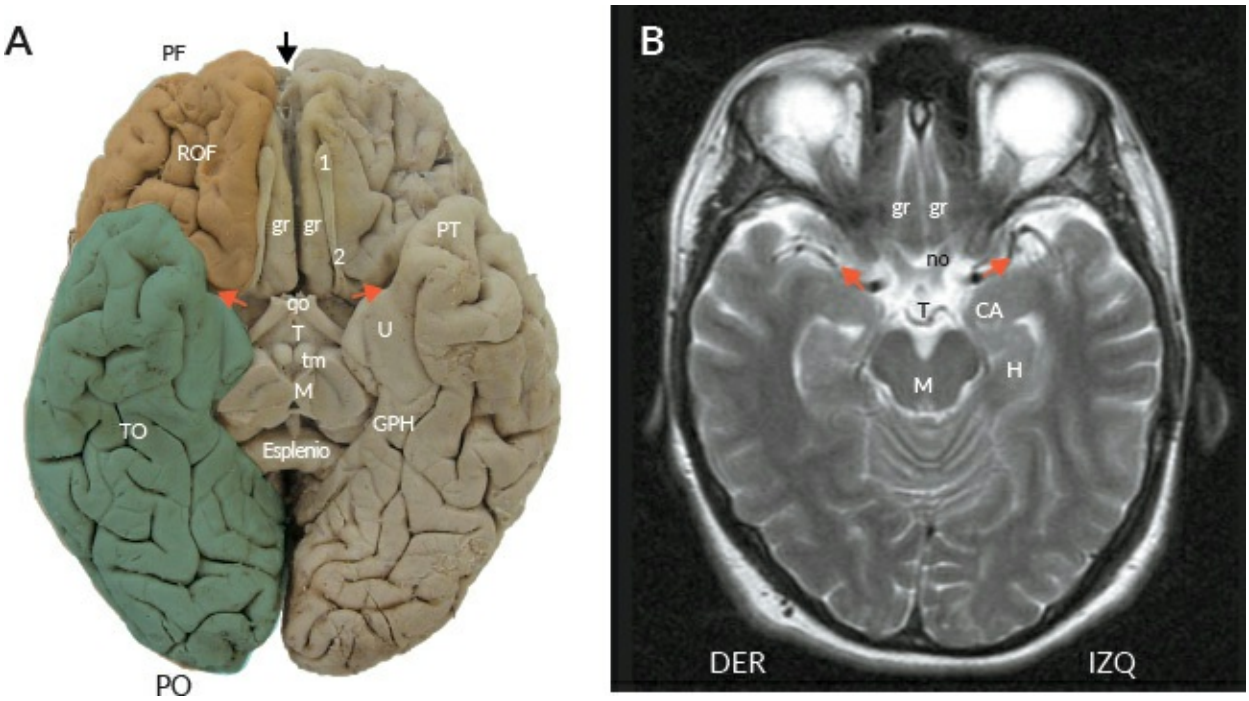


Figura 1.15A. Pieza anatómica con vista inferior del cerebro. PO: polo occipital; PF: polo frontal; PT: polo temporal; ►: surco interhemisférico; ►: surco lateral; ROF: región orbitofrontal; TO: lóbulo temporooccipital; gr: giro recto; 1: bulbo; 2: cintilla olfatoria; tm: tubérculos mamilares; T: túber; qo: quiasma óptico; M: mesencéfalo; GPH: giro parahipocampal; U: uncus del hipocampo.

Figura 1.15B. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal del cerebro. gr: giro recto; no: nervios ópticos; T: túber. Las porciones profundas del uncus y del GPH corresponden respectivamente a:

CA: complejo amigdalino y H: hipocampo. DER: lado derecho de la persona; IZQ: lado izquierdo de la persona.

Al realizar un corte sagital a través del surco interhemisférico, se pueden apreciar mejor las partes de la cara medial de los hemisferios y del diencéfalo (figura 1.16). Con facilidad, se identifica el cuerpo calloso y sus diferentes porciones: el esplenio, el cuerpo, la rodilla y el pico o rostrum. Alrededor del cuerpo calloso, se encuentra el lobulillo o giro del cíngulo. Debajo del cuerpo calloso, se distinguen estructuras diencefálicas como el tálamo y el hipotálamo. El lobulillo del cíngulo junto con el giro T5 forman el lóbulo límbico. En esta proyección, se observan claramente el lóbulo occipital —detrás del surco parieto–occipital—, el lóbulo parietal y el lóbulo frontal.

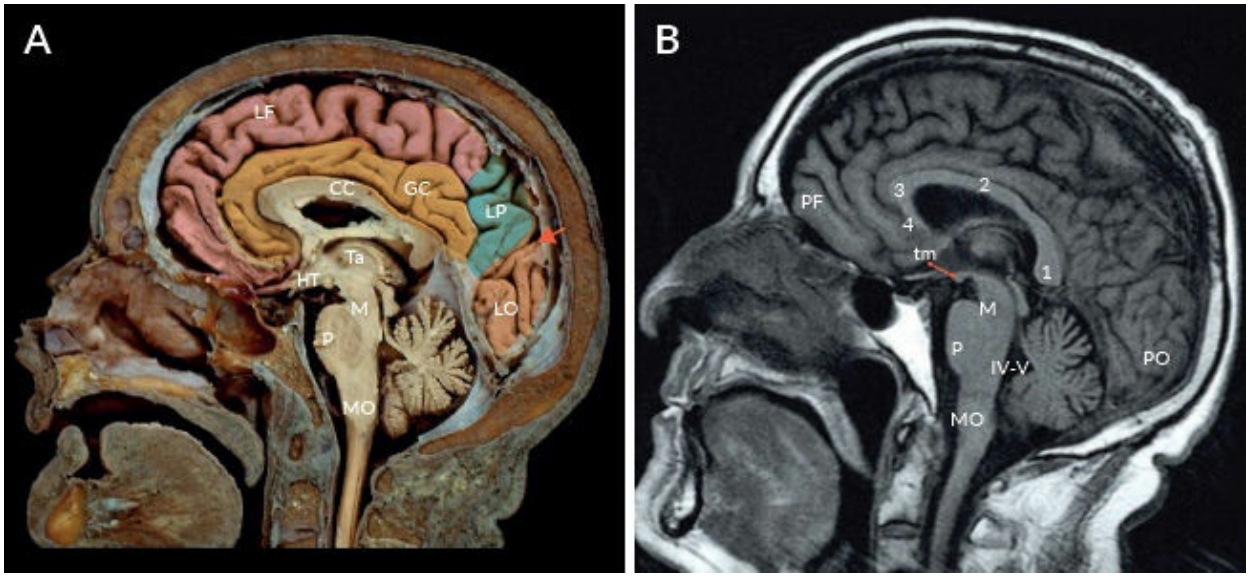


Figura 1.16A. Corte sagital o medial del encéfalo a través del surco interhemisférico. CC: cuerpo calloso; GC: giro del cíngulo; LO: lóbulo occipital; LP: lóbulo parietal; LF: lóbulo frontal; ▶: surco parietooccipital; Ta: tálamo; HT: hipotálamo; M: mesencéfalo; P: puente; MO: médula oblongada; 1: lámina basilar del hueso occipital. Delante, en el mesencéfalo, se aprecia el pedúnculo cerebral; atrás, la lámina colicular; debajo de la MO, el cordón espinal; detrás del tronco cerebral, el cerebelo (es posible ver el vermis). **Fuente:** cortesía del Dr. Luis E. Caro, Laboratorio de Anatomía, Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia.

Figura 1.16B. IRM en T1 (T1–WI) de corte sagital del encéfalo. 1: esplenio; 2: cuerpo del cuerpo calloso; 3: rodilla; 4: pico o rostrum; tm: tubérculo mamilar; M: mesencéfalo; P: puente; MO: médula oblongada; IV–V: cuarto ventrículo; PF: polo frontal; PO: polo occipital.

Tronco cerebral

Debajo de los hemisferios cerebrales y el diencéfalo se encuentra el tronco cerebral, que está constituido por el mesencéfalo, el puente y la médula oblongada, también denominada medula o bulbo raquídeo. Detrás del tronco cerebral se localiza el cerebelo.

El mesencéfalo es la porción más pequeña del tronco cerebral. En su cara anterior se encuentran los pedúnculos cerebrales (derecho e izquierdo), y en

su porción posterior se localiza la lámina colicular (colículos superiores y colículos inferiores). La porción más prominente del tronco cerebral es el puente. La cara anterior de este se relaciona con la lámina basilar del hueso occipital, y la cara posterior, con el cuarto ventrículo y el cerebelo. Está delimitado en su porción rostral por el surco póntico superior y, en su porción caudal, por el surco póntico inferior o bulbo protuberancial.

La médula o bulbo raquídeo se sitúa debajo del puente. Es una extensión directa del cordón espinal, por lo que tiene algunas similitudes anatómicas y funcionales con este. En la cara anterior de la médula, se localizan las pirámides y, en la cara lateral, dos prominencias —una a cada lado— denominadas olivas. Detrás de las olivas están los pedúnculos cerebelosos inferiores. La cara posterior se relaciona con el cuarto ventrículo y, en la parte inferior de esta cara, se localizan dos prominencias: los tubérculos grácil y cuneatus.

Cerebelo

El cerebelo posee dos hemisferios, entre los cuales se encuentra el vermis. Se une al tronco cerebral mediante tres pares de prolongaciones llamadas pedúnculos cerebelosos superiores (brazos conjuntivos), medios (brazos pónticos) e inferiores (cuerpos restiformes). Los pedúnculos cerebelosos superiores conectan el cerebelo con la porción posterolateral del mesencéfalo, los medios, con el puente, y los inferiores, con la médula.

Cordón espinal

El cordón espinal se ubica dentro del canal vertebral o conducto raquídeo. Es una estructura delgada y cilíndrica que se extiende desde la médula oblongada hasta la primera o segunda vértebra lumbar, donde termina formando el cono medular. De este cono se desprende un filamento delgado, rodeado de piamadre y lleno de células gliales que se denomina hilo terminal (filum terminale). Este se dirige hacia abajo para unirse a una prolongación de la duramadre llamada ligamento coccígeo, el cual se inserta en el cóccix, funcionando como ancla del cordón espinal.

En el cordón espinal se distinguen cuatro caras: la cara anterior, que es plana y presenta en su línea media el surco espinal anterior —el cual alberga la arteria espinal anterior—; la cara posterior, que es cilíndrica y presenta en su porción medial el surco espinal posterior; y las dos caras laterales (derecha e izquierda), que se localizan entre las dos caras anteriormente descritas. De esta manera, en el cordón espinal se distinguen también tres pares de cordones: los cordones anteriores, ubicados a cada lado del surco espinal anterior; los cordones posteriores, ubicados a cada lado del surco espinal posterior; y los cordones laterales, situados entre los cordones

anteriores y posteriores. En la región cervical, el cordón espinal posterior está formado por dos cordones o fascículos: el fascículo grácil (medial) y el cuneatus (lateral), que terminan en los tubérculos grácil y cuneatus en la cara posterior del bulbo raquídeo.

Entre el cordón anterior y el lateral emergen las raicillas espinales anteriores, que se unen para formar las raíces anteriores, y entre el cordón posterior y lateral, las raicillas espinales posteriores, que convergen para formar las raíces posteriores. Las raíces anteriores (ventrales) y posteriores (dorsales) transcurren por el conducto raquídeo y, a nivel del agujero de conjunción formado por la sobreposición de las vértebras, se unen para formar los nervios raquídeos o espinales. Las raíces lumbares, sacras y coccígeas descienden por el conducto raquídeo hasta el agujero de conjunción que les corresponde y forman un grupo de raíces que se denomina cola de caballo o cauda equina. En cada raíz dorsal se encuentra un ganglio a nivel del agujero de conjunción, próximo a la unión entre las raíces dorsal y ventral (figura 1.17). La porción del cordón espinal, el par de raicillas espinales y los nervios espinales que se forman a partir de estas constituyen un segmento espinal o medular.

El cordón espinal presenta dos engrosamientos: el cervical y el lumbar. El engrosamiento cervical es la región donde se originan las raíces que inervan las extremidades superiores; se extiende entre el quinto segmento cervical y el primero torácico. En el engrosamiento lumbar se originan las raíces espinales que inervan las extremidades inferiores; este se extiende entre el segundo segmento lumbar y el tercer sacro.

En un corte transversal del cordón espinal se puede observar la sustancia gris en el centro (en forma de H) rodeada por sustancia blanca. La sustancia gris contiene los cuerpos de las neuronas y se divide en dos cuernos o astas: anteriores o ventrales y posteriores o dorsales. En las astas posteriores se encuentran grupos de neuronas organizadas en capas que reciben impulsos aferentes de la periferia, mientras que en las astas anteriores, grupos de neuronas motoras e interneuronas que regulan la producción de impulsos eferentes (figura 1.17). La sustancia blanca está constituida por tractos de axones mielinizados que forman fascículos ascendentes y descendentes. Las vías ascendentes llevan información hacia el encéfalo y las descendentes transportan comandos motores y moduladores desde el encéfalo hacia otras regiones.

El cordón espinal se divide en cinco regiones nombradas en dirección rostral–caudal así: a) región cervical, constituida por ocho pares de segmentos espinales; b) región torácica, compuesta por doce pares; c) región lumbar, formada por cinco pares; d) región sacra, conformada por cinco pares; y e) cordón espinal coccígeo, que incluye un segmento espinal coccígeo (figura 1.18).

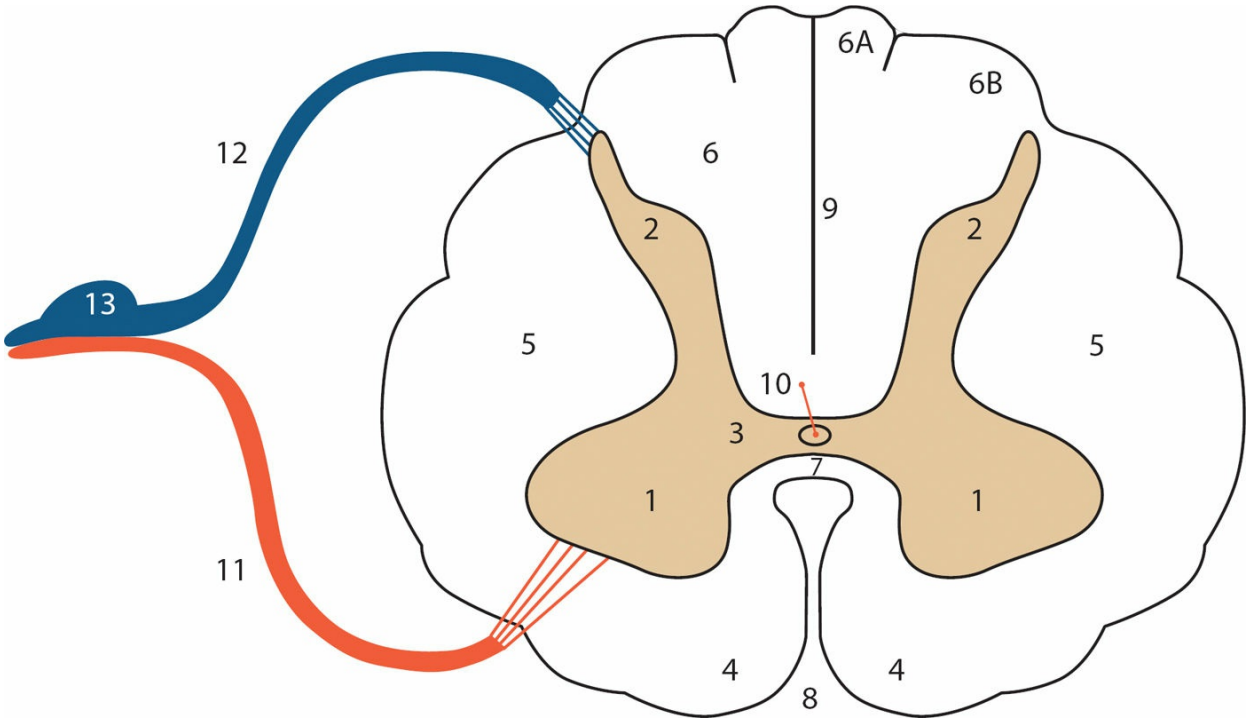


Figura 1.17. Corte transversal del cordón espinal. 1: astas anteriores; 2: astas posteriores, 3: comisura gris; 4: cordón anterior; 5: cordón lateral; 6: cordón posterior; 6A: fascículo grácil; 6B: fascículo cuneatus; 7: comisura blanca anterior; 8: surco espinal anterior; 9: surco espinal posterior; 10: conducto del epéndimo; 11: raíz anterior; 12: raíz posterior; 13: ganglio de la raíz posterior.

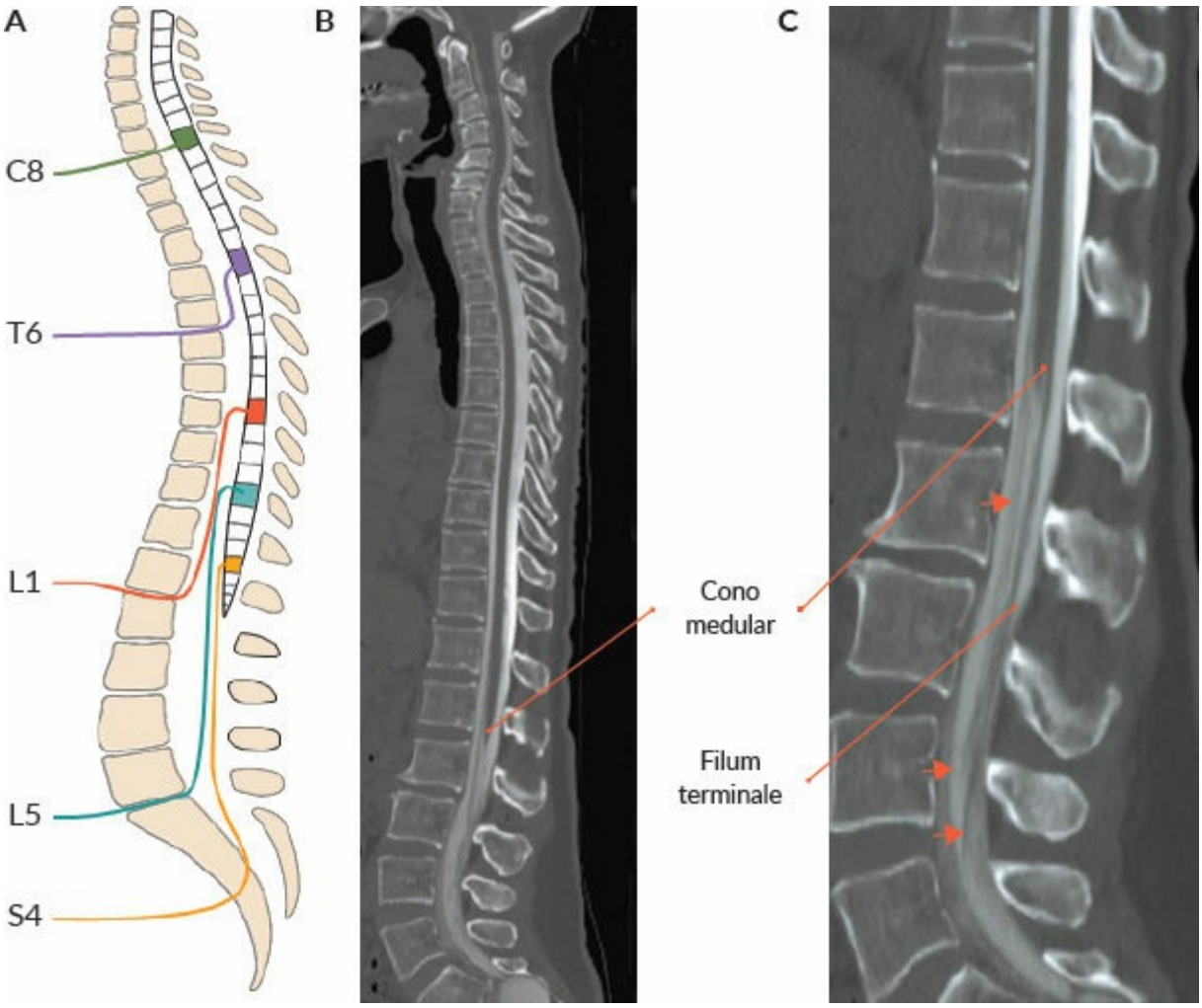


Figura 1.18A. Esquema del cordón espinal que muestra sus segmentos con algunas raíces y nervios raquídeos.
Figura 1.18B. Mielo–TAC de corte sagital en el que se observa el líquido cefalorraquídeo en blanco por el medio de contraste y el cordón espinal en negro.
Figura 1.18C. Acercamiento de la región lumbar donde se aprecia la parte caudal del cordón espinal (el cono medular) y las raíces espinales que forman la cola de caballo (▶) y el filum terminale.

Como se mencionó antes, la porción del cordón espinal que da origen a un determinado par de nervios espinales constituye un segmento medular o segmento espinal; por ende, el cordón espinal se compone de 31 segmentos. Durante el desarrollo embrionario, cada nervio espinal guarda relación con un somita, de manera que los segmentos espinales están relacionados sistemáticamente con áreas de la piel, músculos y, a veces, huesos. El área inervada por un segmento espinal constituye un dermatoma (en el caso de áreas sensitivas) o un miotoma (en el caso de músculos).

INTRODUCCIÓN A LA NEURORRADIOLOGÍA CLÍNICA

Los avances en iconología, particularmente en neurorradiología, constituyen uno de los campos más desarrollados de la medicina. Las técnicas modernas

para la producción de neuroimágenes han revolucionado tanto la práctica clínica como las áreas de investigación en neurociencias. A continuación, se describen las técnicas más usadas en la práctica clínica.

Tomografía axial computarizada (TAC)

Entre 1972 y 1973, el ganador del premio Nobel Sir Godfrey Hounsfield desarrolló la TAC para uso clínico. La primera compañía que distribuyó escáneres para TAC fue EMI (Electric and Musical Industries Ltda.), famosa por distribuir los discos de los Beatles. La TAC se desarrolló a partir de la tecnología convencional de rayos X y, por lo tanto, comparte sus principios. Por ejemplo, la TAC también mide la densidad de los tejidos estudiados; pero, en vez de tomar una sola vista, en la TAC el tubo de rayos X rota alrededor del paciente capturando diferentes tomas de un mismo corte. De ahí el término tomografía, que viene del griego tomos: sección. Las tomas obtenidas se reconstruyen por computador para lograr una imagen detallada de todas las estructuras en el corte: tejidos blandos, líquido, aire y hueso. De ahí el nombre de tomografía computarizada.

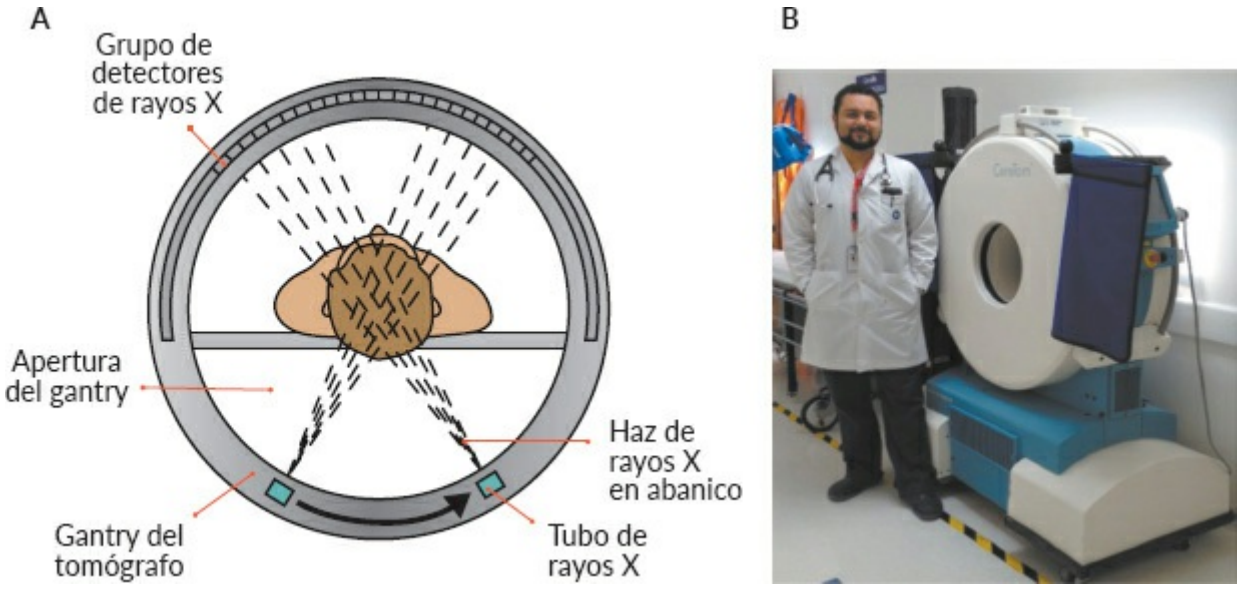


Figura 1.19A. Esquema de una TAC. **Fuente:** adaptada de (5).
Figura 1.19B. TAC portátil comparado con el tamaño de un residente de neurocirugía.

El procedimiento se realiza de la siguiente manera: el paciente reposa en posición supina sobre una mesa especial denominada gantry, que se mueve a través de un escáner en forma de anillo. Cada vez que la mesa se detiene, los rayos X emitidos a partir de diferentes puntos del anillo atraviesan el cuerpo del paciente y son detectados por sensores en el lado opuesto del anillo (figura 1.19). Las imágenes obtenidas con la TAC se presentan en los planos horizontal (axial), coronal y sagital. Por nomenclatura iconológica, en

los cortes horizontales y coronales, «DER» corresponde al lado derecho de la persona e «IZQ», al lado izquierdo (figura 1.20).

Como en los rayos X convencionales, las estructuras densas como huesos y otras calcificaciones aparecen en color blanco, mientras que las menos densas como el aire se presentan en negro. Los términos hiperdenso (alto nivel de absorción de los rayos X) e hipodenso (baja absorción de los rayos X) son usados con frecuencia para referirse a áreas brillantes y oscuras, respectivamente. Las estructuras de densidad intermedia como el tejido nervioso aparecen en gris y se denominan isodensas. El líquido cefalorraquídeo (LCR) se presenta con tonalidad gris oscura y el tejido graso, como el tejido graso subcutáneo, también es de apariencia oscura. La sustancia blanca se observa ligeramente más oscura (hipodensa) que la sustancia gris.

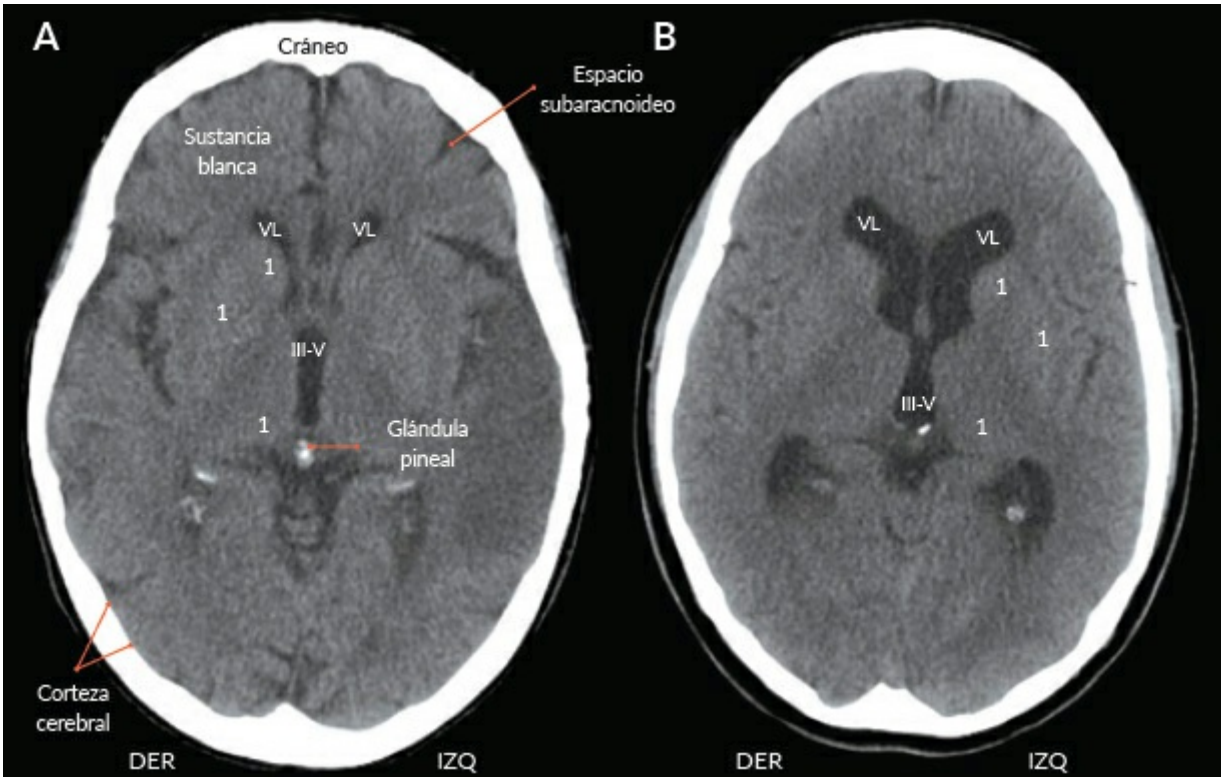


Figura 1.20A. TAC cerebral simple de corte horizontal. 1: núcleos basales; VL: ventrículo lateral; III–V: tercer ventrículo.

Figura 1.20B. TAC cerebral simple con aumento en el tamaño de los ventrículos. 1: núcleos basales; VL: ventrículo lateral; III–V: tercer ventrículo.

Recientemente, se ha desarrollado la TAC helicoidal, que obtiene imágenes de forma continua mientras el paciente se desliza por el escáner sin necesidad de paradas. Además, en vez de adquirir cortes (slices) únicos, la TAC helicoidal obtiene múltiples cortes sobrepuestos utilizando hasta cuatro líneas de detectores. Esta técnica logra imágenes con mejor resolución en un tiempo menor.

La TAC cerebral es útil para identificar hemorragias, infartos cerebrales,

neoplasias, hidrocefalia y alteraciones vasculares como las malformaciones arteriovenosas (MAV) o los aneurismas. Para estudiar el sistema vascular, se debe aplicar contraste, que es una sustancia con yodo más densa que el tejido cerebral y, por consiguiente, tiene una apariencia hiperdensa (blanca) en las imágenes.

También existe una técnica llamada mielografía, en la que se inyecta líquido radiopaco soluble en agua en el espacio subaracnoideo mediante una punción lumbar. El paciente debe ubicarse en una mesa inclinada para facilitar que el contraste fluya por el espacio subaracnoideo, bajo el efecto de la gravedad, a lo largo de todo el conducto raquídeo. Dado que la mielografía se realiza al tiempo que se toma la TAC, también se conoce como mielo–tac (figura 1.21).

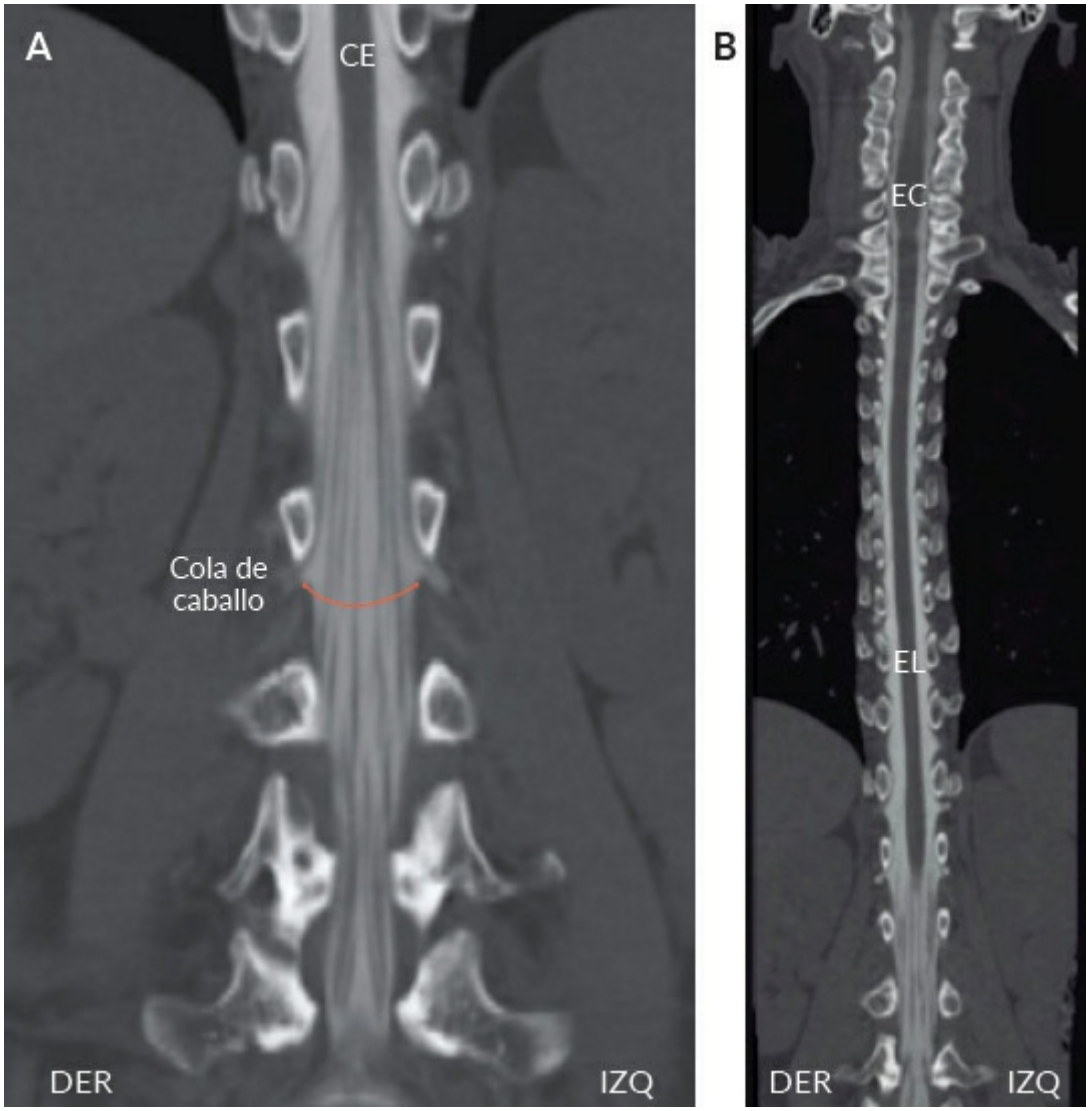


Figura 1.21A. Mielo–TAC de las regiones lumbar y sacra de la columna vertebral. CE: cordón espinal.

Figura 1.21B. Mielo–TAC de todo el conducto raquídeo. Se observa el cordón espinal en negro (hipodenso), el líquido cefalorraquídeo en blanco (hiperdenso) y las raíces de la cauda equina en la cisterna lumbar. EC: engrosamiento cervical; EL: engrosamiento lumbar.

Imágenes por resonancia magnética (IRM)

La resonancia magnética es un área investigativa de la física a la que muchos científicos han dedicado su esfuerzo. En 1952, se otorgó el premio Nobel en Física a Felix Bloch y Edward Purcell por sus trabajos independientes y simultáneos en resonancia magnética de materiales sólidos. En 2003, se otorgó el premio Nobel en Fisiología o Medicina a Paul Lauterbur y Peter Mansfield por su contribución al desarrollo de las IRM.

Las IRM se desarrollaron con base en los principios de la resonancia magnética nuclear (RMN). Hay dos tipos de magnetos que se utilizan en imágenes clínicas: los magnetos permanentes y los magnetos superconductores. Los magnetos permanentes son dos barras de aleaciones metálicas recubiertas de hierro que generan un campo magnético uniforme entre ellas. El paciente se coloca entre los dos magnetos y el campo magnético se orienta perpendicular al eje del cuerpo en posición supina (figura 1.22A). Los magnetos superconductores están encapsulados en un compartimento con helio líquido para prevenir la disipación de la energía. Una capa aisladora externa de nitrógeno líquido se utiliza para mantener el helio frío. Las bobinas que producen el campo magnético (coils) están fabricadas de niobio–titanio. El campo magnético estático de un magneto superconductor está orientado paralelo al eje del cuerpo del paciente en posición supina. Este campo se genera por una corriente eléctrica circulante en la bobina que rodea la apertura del escáner.

Los protones de todos los átomos giran alrededor de sus propios ejes, lo que crea un momento dipolo para cada protón. En la ausencia de un campo magnético, los protones se organizan de forma aleatoria; pero cuando los magnetos permanentes y superconductores crean un campo magnético, estos se alinean de forma paralela al campo. Aunque están presentes en los núcleos de todos los átomos, los protones relevantes para las IRM convencionales son los del hidrógeno, que es el elemento más abundante en los tejidos corporales (agua y grasa) y el que produce la señal magnética más intensa.

Un átomo hipotético que representa la tendencia general no se mantiene estático, gira sobre su propio eje y se mueve (precesa) alrededor del eje del campo magnético a una frecuencia proporcional a la intensidad del campo magnético. La frecuencia del hidrógeno es de 42.5 MHz por cada unidad Tesla. A esta frecuencia se estimulan los protones para entrar en resonancia (figura 1.22B). Cuando el paciente se coloca en el escáner, los dipolos magnéticos de los tejidos se alinean con relación al campo magnético. Luego, se aplica un pulso breve de radiofrecuencia con una antena emisora a la parte del cuerpo que se va a estudiar. Los protones reciben la energía de este pulso y, como resultado, cambian su alineación de un plano longitudinal a uno transverso produciendo lo que se conoce como magnetización

transversa.

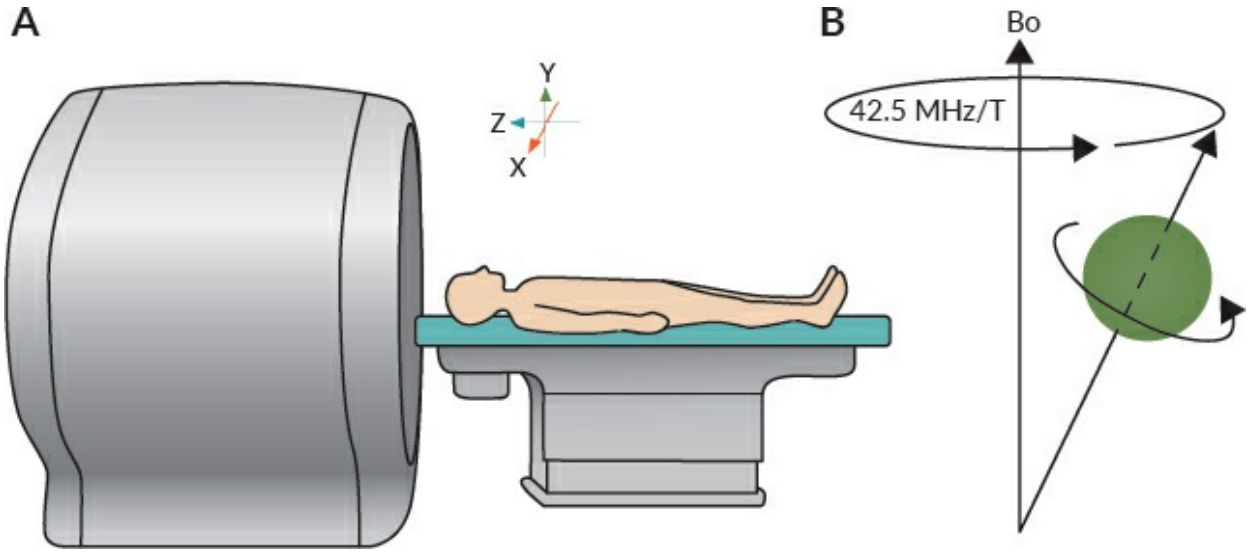


Figura 1.22A. Posición del paciente durante la toma de IRM.
Figura 1.22B. Esquema de un átomo de hidrógeno girando alrededor de un campo magnético. Bo: campo magnético. **Fuente:** adaptada de (6).

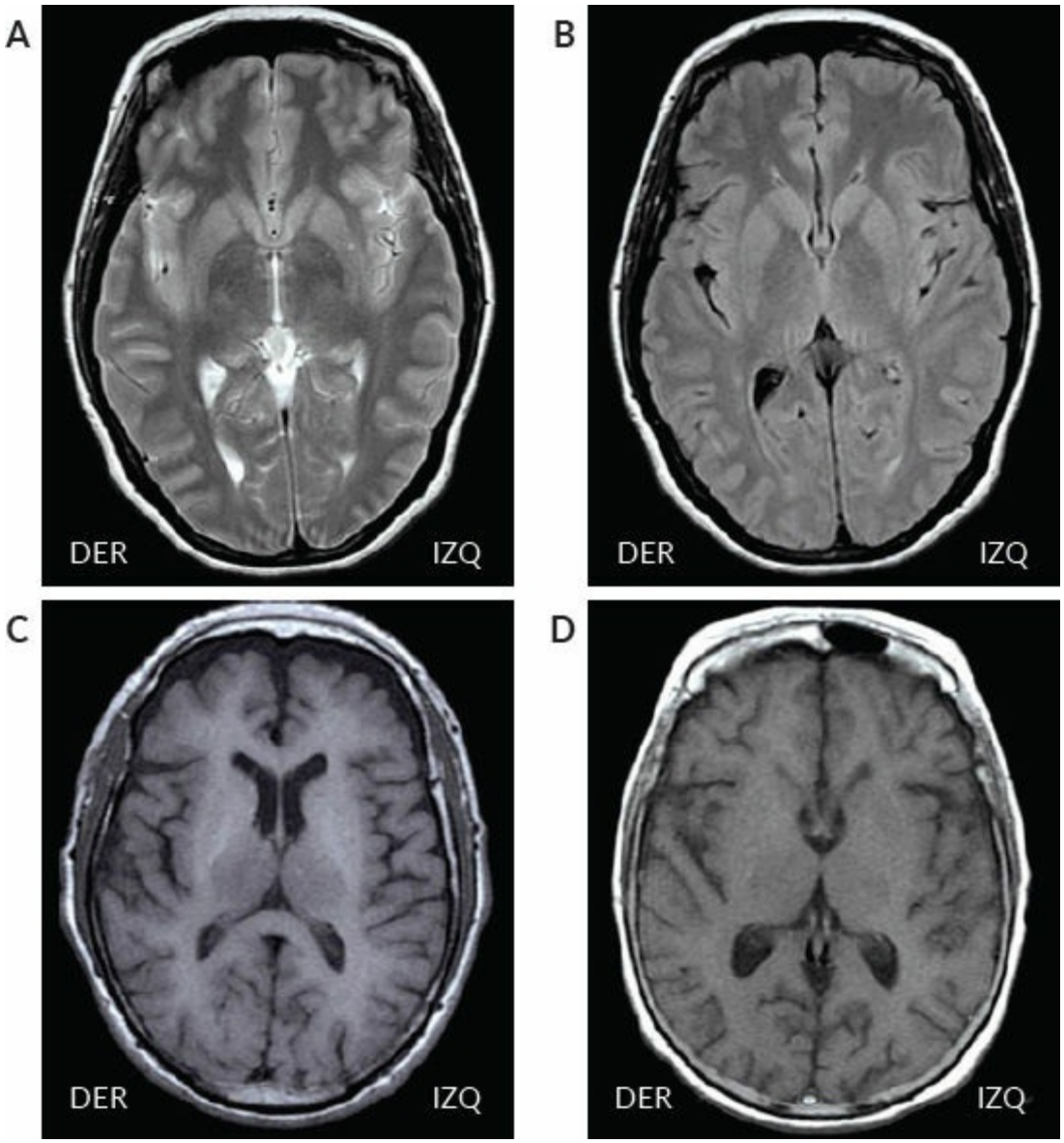
Cuando el pulso de radiofrecuencia termina, los protones retoman su posición original y liberan energía en forma de ondas electromagnéticas. La energía de la radiofrecuencia que fue absorbida y posteriormente emitida produce un signo magnético que es detectado por la antena receptora. Para crear imágenes de tejidos a partir de estas señales, los pulsos de radiofrecuencia deben ser repetidos muchas veces (secuencia de impulsos). El tiempo que transcurre entre cada secuencia de impulsos se denomina tiempo de repetición (TR). Un TR prolongado produce imágenes de mayor calidad porque permite más tiempo para la recuperación de la magnetización antes del siguiente pulso. El escáner almacena estas señales como una matriz de datos que es analizada por el computador para construir la imagen.

Para la mayoría de las secuencias de pulsos, las intensidades de los signos en las IRM son determinadas por las propiedades de los tejidos (tabla 1.2); específicamente, la densidad de los protones y los tiempos de relajación de estos: T1 (tiempo de relajación longitudinal) y T2 (tiempo de relajación transverso). En la figura 1.23 es posible observar las diferencias en las densidades de los tejidos.

Tabla 1.2. Características de las imágenes por resonancia magnética.

Tejido	Secuencia T1 T1-W1	Secuencia T2 T2-W1	FLAIR
Sustancia gris	Gris	Gris claro	Gris claro
Sustancia blanca	Blanco	Gris oscuro	Gris
LCR	Negro	Blanco	Gris oscuro

Grasa	Blanco	Blanco	Blanco
Aire	Negro	Negro	Negro
Hueso o calcio	Negro	Negro	Negro
Edema	Gris	Blanco	Blanco



Figuras 1.23 A y B. IRM de cortes axiales del cerebro en secuencias T2–WI y T2–FLAIR, respectivamente.
Figura 1.23 C y D. IRM de cortes axiales del cerebro en secuencia T1–WI.

En las IRM se utilizan diferentes pulsos de radiofrecuencia para enfatizar el contraste entre T1 y T2. La secuencia más usada es la de pulso de eco de espín (SE, por su sigla en inglés). Para aplicarla, se deben introducir dos tiempos de intervalo: el tiempo de repetición (TR) y el tiempo de eco (TE), que es el tiempo que transcurre entre el estímulo y la generación de una onda de radio por el tejido estimulado. El TR determina el tiempo durante la relajación

de T1 cuando se toma la imagen, el TE determina el momento durante la relajación de T2 en que se obtiene la imagen. El contraste entre los diferentes tejidos se amplifica tempranamente durante el T1, de tal manera que un TR y un TE cortos aumentan el contraste y la imagen resultante se denomina T1–weighted image (T1–WI). Por el contrario, un TR y un TE largos aumentan el contraste en el T2 y la imagen resultante se denomina T2–weighted image (T2–WI). En otras palabras, las imágenes T1–WI se ven como cortes anatómicos; es decir, la sustancia gris se ve gris y la blanca se ve blanca; mientras que las imágenes T2–WI se ven como un negativo opuesto a las T1–WI. Una imagen intermedia, es decir, con un TR prolongado y un TE corto, se denomina densidad de protones.

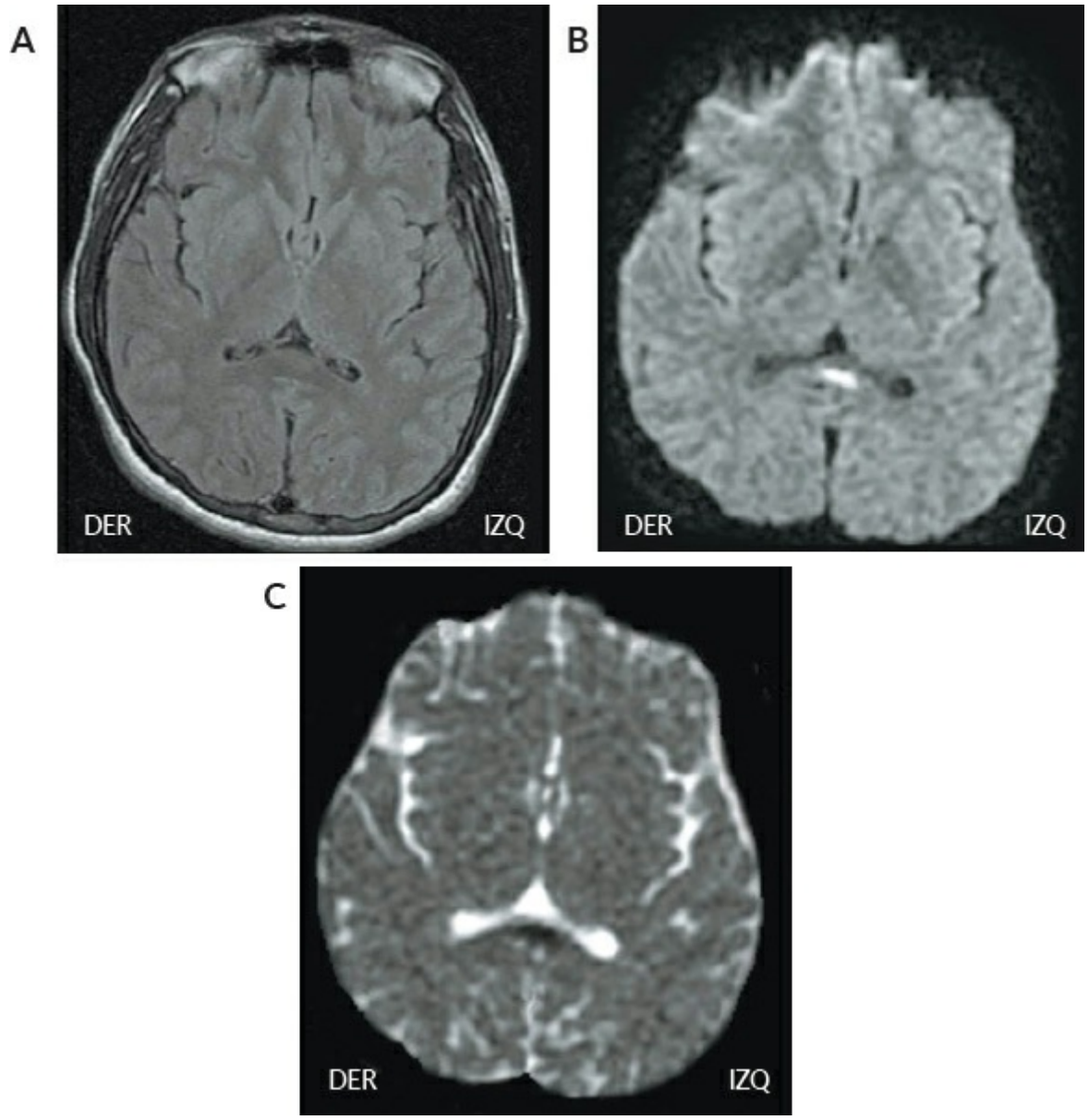


Figura 1.24A. IRM en secuencia T2–WI (FLAIR) que detecta posible lesión en el esplenio del cuerpo calloso de un paciente quien llega al servicio de urgencias con déficit neurológico súbito.
Figura 1.24B. IRM en secuencia de difusión (DWI) que muestra lesión brillante (hiperintensa) en el esplenio del cuerpo calloso del mismo paciente.

Figura 1.24C. IRM en mapa ADC que muestra restricción de la señal (hipointensa) y sugiere infarto agudo del esplenio del cuerpo calloso en el mismo paciente.

Una de las fallas de las T2–WI es que, en ocasiones, el brillo del LCR impide detectar las patologías localizadas en el parénquima adyacente a los ventrículos. Para solucionar este problema, la mayoría de los escáneres para IRM incluyen las denominadas imágenes en FLAIR (Fluid– Attenuated Inversion Recovery), una técnica que emite una señal alta para el parénquima o tejido cerebral y una señal baja para el LCR (figura 1.23B). Las imágenes en FLAIR detectan estados tempranos de infarto y acentúan las lesiones inflamatorias desmielinizantes.

En las IRM, las áreas se describen en términos de intensidad o brillantez. Las áreas brillantes se denominan hiperintensas y las oscuras, hipointensas. Se denominan isointensas las áreas similares al tejido nervioso. Las diferentes apariencias de las imágenes se resumen en la tabla 1.2.

Otra secuencia utilizada en la práctica clínica es la de imágenes por difusión (DWI, por su sigla en inglés). Las DWI son imágenes adquiridas de forma rápida para medir la difusión de los protones de agua en el tejido cerebral. Esta técnica puede detectar cambios celulares asociados a infartos cerebrales dentro de los primeros 30 minutos del evento, mientras que las T2–WI o las FLAIR detectan los infartos varias horas después. Para mejorar su especificidad, las DWI se combinan con imágenes del coeficiente aparente de difusión (ADC, por su sigla en inglés) dando lugar a un mapa ADC. Los infartos agudos son brillantes (muestran aumento de la señal) en las DWI y negros (restricción de la señal) en el mapa ADC (figura 1.24).

Las IRM se pueden realizar de forma simple o con la administración de un medio de contraste. En este caso, generalmente se aplica gadolinio intravenoso, que produce una señal brillante al recorrer los vasos sanguíneos o atravesar la barrera hematoencefálica cuando hay permeabilidad anormal de la misma.

Las IRM de la columna vertebral proveen imágenes en las que se pueden identificar los cuerpos vertebrales, los discos intervetebrales, el cordón espinal y las raíces espinales, incluyendo la cauda equina (figura 1.25). Esta técnica ha reemplazado a la mielografía con contraste, excepto en ciertas circunstancias en las que se requieren imágenes de alta resolución de los nervios raquídeos o del cordón espinal.

Figura 1.25. IRM en secuencia T1 (T1–WI) del cordón espinal en la región cervical. 1: cuerpo vertebral; 2: disco intervertebral; 3: apófisis espinosa; MO: médula oblongada; LCR: líquido cefalorraquídeo.

En la actualidad, se han desarrollado nuevas secuencias de pulsos en IRM como la espectroscopia por resonancia —que mide los neurotransmisores y otras sustancias y tiene aplicación clínica en la evaluación de tumores— y la tractografía (diffusion tensor tractrography) —que permite seguir los principales tractos al interior del encéfalo—.

Las IRM funcionales (IRMf) se utilizan para evaluar las funciones de las diferentes áreas del encéfalo. El desarrollo de las IRMF ha causado un auge de la investigación de las neurociencias y ha permitido avanzar en el conocimiento de las funciones cerebrales.

El uso de marcapasos o desfibriladores es una absoluta contraindicación para obtener IRM. Sin embargo, la mayoría de los dispositivos modernos como las válvulas prostéticas cardíacas, los clips para aneurismas y las derivaciones ventriculares son poco ferromagnéticos y no representan riesgos para la realización de IRM.

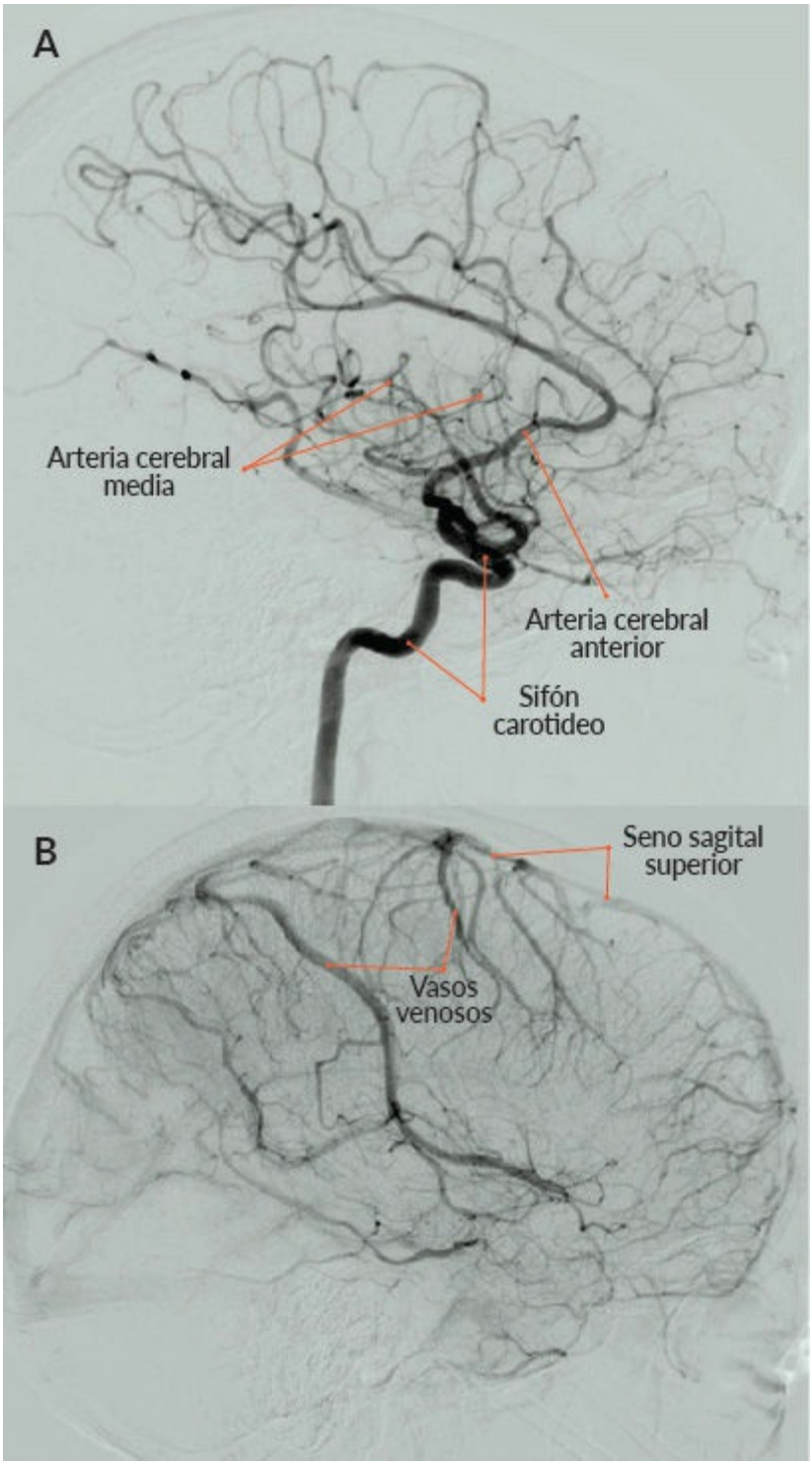


Figura 1.26A. Arteriografía de la arteria carótida interna.
Figura 1.26B. Fase venosa de la imagen anterior.

Neuroangiografía

La angiografía o arteriografía cerebral es una de las técnicas neurorradiológicas más antigua y su papel ha venido cambiando con los años. A diferencia de las TAC y las IRM, la angiografía es un procedimiento invasivo. Bajo anestesia local, se inserta un catéter, usualmente en la arteria femoral,

que es guiado usando rayos X hasta las arterias carótidas o vertebrales. Mediante este catéter, se inyecta un medio de contraste yodado radiopaco dentro de los vasos arteriales o venosos. Las arterias se visualizan tempranamente, mientras que las venas se visualizan mejor en las secuencias de imágenes tardías (figura 1.26). La arteriografía convencional ha sido reemplazada por técnicas no invasivas como la angiografía por IRM y TAC, que permiten visualizar los vasos intracraneanos y las arterias carótidas y vertebrales sin generar tanta incomodidad en el paciente.

REFERENCIAS

1. Stebani K. Lagartija esmeralda [imagen]. Pixabay; 5 jul 2012 [citado 3 nov 2016]. Disponible en: https:// goo.gl/9O9MRN.
2. Efraimstochter. Surgeon fish paleta [imagen]. Pixabay; 1 jun 2015 [citado 3 nov 2016]. Disponible en: https://goo.gl/4wd49C.
3. Shuklin G. Mus musculus [imagen]. Wikimedia Commons; 24 nov 2008 [citado 3 nov 2016]. Disponible en: https://goo.gl/bvpE1H.
4. Siegel A, Sapru H. Essential neuroscience. 2.ª ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2009.
5. Blumenfeld H. Neuroanatomy through clinical cases. 2.ª ed. Sunderland: Sinauer Associates Inc.; 2010.
6. Morillo AJ. Apuntes magnéticos. Física de la resonancia magnética–secuencias. 2011 [citado 3 nov 2016]. Disponible en: https://goo.gl/IMWLYm.

LECTURAS RECOMENDADAS

1. Yousem D, Grossman R. Neuroradiology: the requisites. 3.ª ed. Philadelphia: Mosby/Elsevier; 2010.
2. Ropper A, Samuels M. Adams and Victor's principles of neurology. 9.ª ed. New York: McGraw–Hill Inc.; 2009.
3. Nolte J. The human brain: an introduction to its functional anatomy. 6.ª ed. St. Louis: Mosby/Elsevier; 2009.

CAPÍTULO 2

DESARROLLO DEL SISTEMA NERVIOSO

Una de las etapas iniciales del desarrollo embrionario es la gastrulación, en la que se forman las tres capas germinativas: el ectodermo (capa externa), el mesodermo (capa intermedia) y el endodermo (capa interna). Durante la gastrulación también se define la línea media y el eje anteroposterior del embrión. A lo largo de la línea media se forma la notocorda, un cilindro mesodérmico que se extiende en dirección anteroposterior (figura 2.1) y que induce el desarrollo de la placa neural, es decir, la transformación de las células ectodérmicas ubicadas en la línea media en células nerviosas.

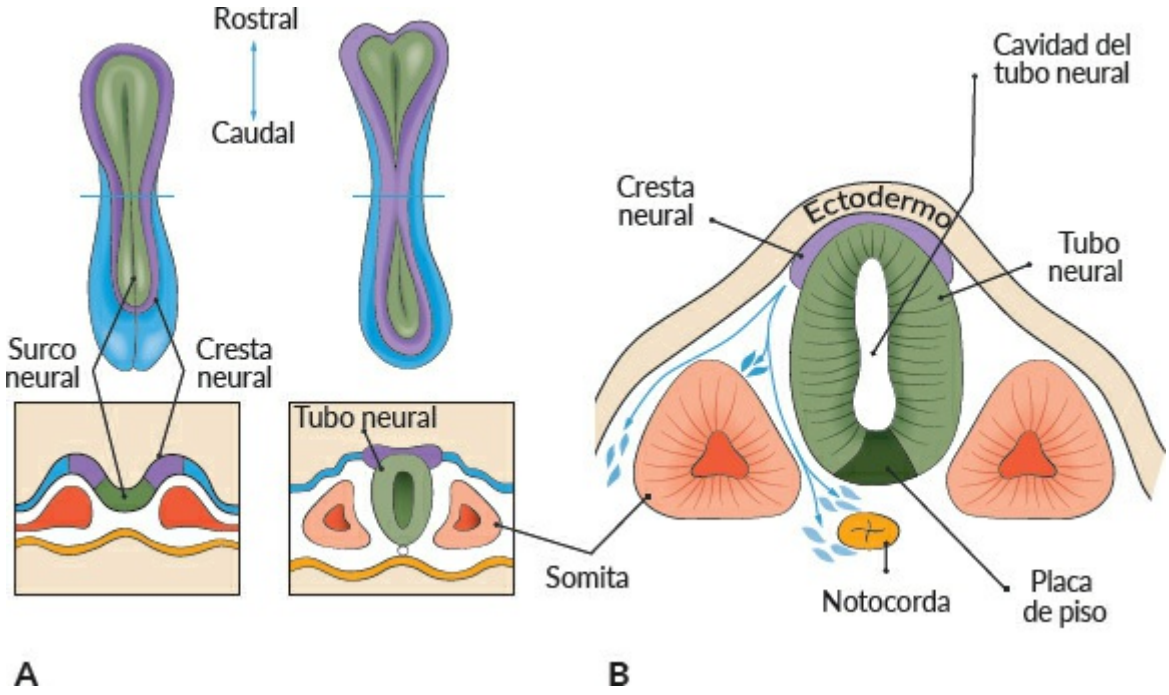


Figura 2.1A. Esquemas de vistas dorsales (arriba) y cortes coronales (abajo) de embriones. El primer paso para el desarrollo del sistema nervioso es la formación del surco neural, cuyas paredes (pliegues neurales) se unen para formar el tubo neural y la cresta neural. **Fuente:** adaptada de (1). **Figura 2.1B.** Esquema de corte coronal del tubo neural formado. Se observa la placa del piso y su cercanía con la notocorda, así como la región dorsal y su relación con la cresta neural.

Luego, la placa neural se engrosa y expande en la línea media. Posteriormente, se produce una invaginación a lo largo de toda la placa y se forma el surco neural, el cual se hace cada vez más profundo. En el proceso de invaginación del surco, las células de la porción lateral de la placa neural migran hacia una posición dorsal y forman la cresta neural. A medida que el

embrión crece, las paredes del surco (pliegues neurales) se fusionan formando el tubo neural o neurotubo. Las paredes del tubo neural dan origen a todo el sistema nervioso central, mientras que la cavidad del tubo origina las cavidades ventriculares del encéfalo y el conducto del epéndimo en el cordón espinal. Al tiempo que los pliegues neurales se unen, se desprende el neuroectodermo, que da origen a una capa separada del neurotubo: la cresta neural. El proceso mediante el cual la placa neural se convierte en el tubo neural se conoce como neurulación.

La formación del tubo neural es un evento crucial en el desarrollo del sistema nervioso que ocurre alrededor de la tercera semana de gestación. La falla en el cierre del tubo neural es un defecto que se presenta en aproximadamente uno de cada 500 nacimientos. Un reciente descubrimiento de enorme importancia en salud pública mostró que una dieta enriquecida con ácido fólico o folatos disminuye la incidencia de estos defectos hasta en un 90 %.

La cresta neural se desarrolla en cercanía con el mesodermo subyacente. El mesodermo forma una serie de prominencias a cada lado del neurotubo denominadas somitas. A partir de los somitas se desarrollan las vértebras con sus grupos musculoesqueléticos relacionados y las capas dérmicas de la piel.

Las células de la cresta neural se convierten en diferentes grupos de neuronas. Unas serán las neuronas sensitivas (aferentes) de los pares craneanos v, vii, ix y x, y los ganglios y neuronas aferentes de los pares raquídeos. Otras serán las células ganglionares (ganglios prevertebrales y paravertebrales) y las neuronas posganglionares del sistema visceral eferente, constituido por los sistemas simpático y parasimpático. Finalmente, algunas serán células cromafines en la médula de la glándula adrenal o suprarrenal, células de Schwann y melanocitos (células pigmentarias de la piel). La diferenciación de las células de la placa neural está determinada por la presencia de proteínas organizadoras como la folistatina y la nogina, que bloquean el efecto supresor de la proteína morfogenética ósea y desencadenan la expresión de los factores de transcripción en el desarrollo celular. Por su proximidad con la notocorda, las células de la porción ventromedial del neurotubo se agrupan en una capa conocida como la placa del piso. Estas células se diferencian en neuronas motoras. Las células precursoras que están alejadas de esta estructura se diferencian en neuronas sensitivas.

Entre los factores que intervienen en la inducción neural se destacan las moléculas que pertenecen al grupo de factores de crecimiento del fibroblasto (FCF), y las proteínas morfogenéticas óseas (PMO), que pertenecen a la familia de los factores de transformación de crecimiento y están involucradas en la formación de la cresta neural y de la porción dorsal del neurotubo. Otros factores que influyen en el proceso de inducción neural son el ácido retinoico y el factor en erizo o Sonic hedgehog (SHH), que es inducido por la notocorda

y se relaciona con la diferenciación neuronal de la porción ventral del neurotubo (placa del piso). Esta, a su vez, induce la diferenciación de neuronas motoras ventrales e interneuronas. Algunas proteínas de la familia Wnt también intervienen en la diferenciación neuronal de la cresta neural. Estas moléculas se producen en una gran variedad de tejidos embrionarios como la notocorda, el pie del neurotubo, el ectodermo neuronal y los somitas.

FORMACIÓN DE LAS VESÍCULAS

Una vez se forma el neurotubo, se produce la acodadura cervical. La porción rostral del neurotubo respecto a la acodadura dará origen al encéfalo y la porción caudal, al cordón espinal. Inicialmente, en la porción rostral se forman las vesículas primarias: el prosencéfalo (cerebro anterior), el mesencéfalo (cerebro medio) y el rombencéfalo (cerebro posterior) (figura 2.2).

Con excepción del mesencéfalo, a partir de las vesículas primarias se forman las vesículas secundarias (figura 2.2). Del prosencéfalo se deriva el telencéfalo, que está formado por dos vesículas telencefálicas y el diencéfalo, del que se derivan dos vesículas ópticas. Las vesículas ópticas crecen y se invaginan para formar el tallo óptico y la cúpula óptica, que a su vez dan lugar al nervio óptico y la retina, respectivamente. Cada vesícula telencefálica origina un hemisferio cerebral. Del rombencéfalo se derivan el metencéfalo y el mielencéfalo (figura 2.3).

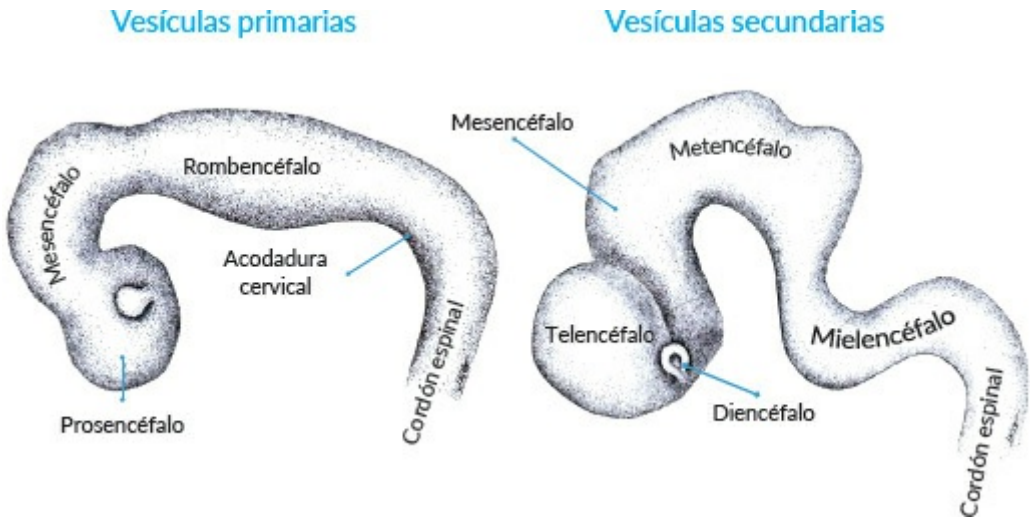


Figura 2.2. Esquema del neurotubo en el que se señala la posición de la acodadura cervical y la formación de las vesículas primarias y secundarias. **Fuente:** adaptada de (2).

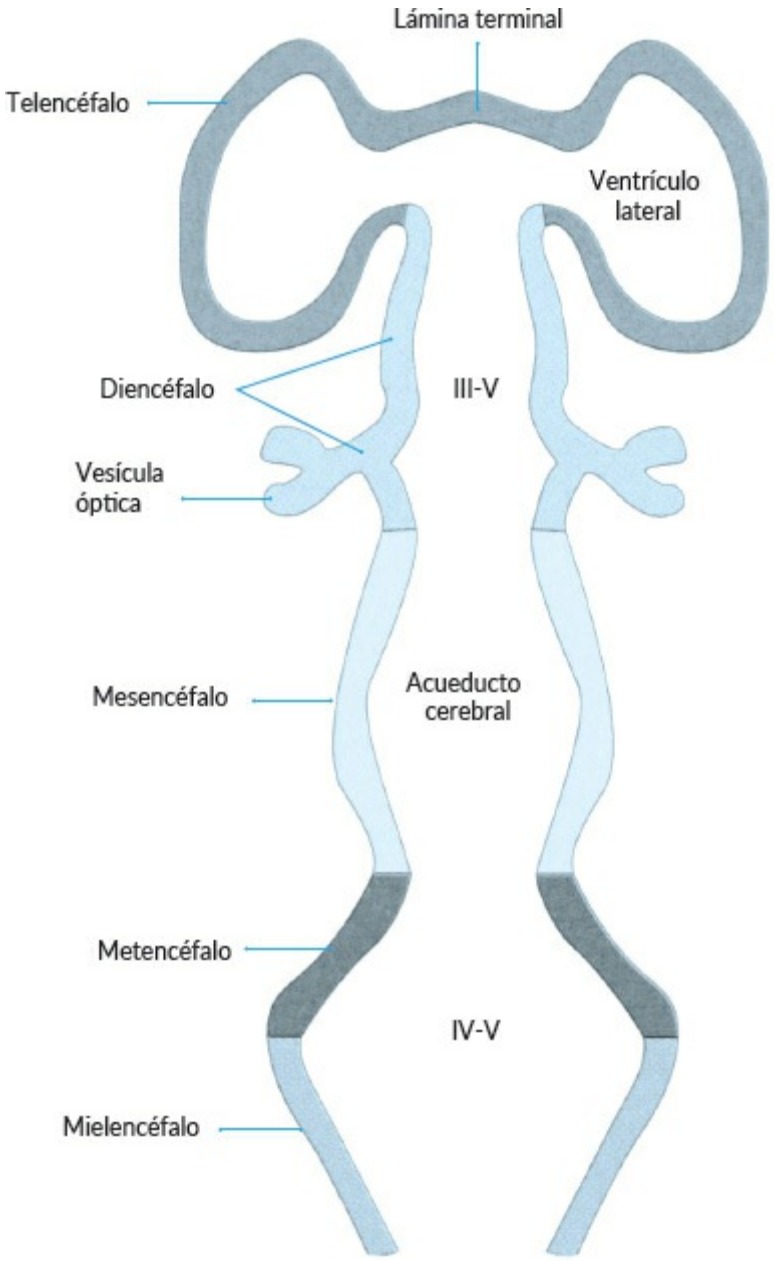


Figura 2.3. Estructuras secundarias que se derivan de las vesículas primarias. III–V: tercer ventrículo; IV–V: cuarto ventrículo.

A partir de las vesículas secundarias se forman las estructuras finales del sistema nervioso. Del telencéfalo se forman: la corteza cerebral, el hipocampo, los núcleos basales, la sustancia blanca y el cuerpo calloso. Del diencéfalo surgen: el tálamo, el hipotálamo, los nervios ópticos, la retina, el metatálamo, el epitálamo y el subtálamo. En el mesencéfalo se originan los pedúnculos cerebrales y la lámina colicular o tectum. El metencéfalo da lugar al cerebelo y al puente o protuberancia, y el mielencéfalo origina la médula oblongada o bulbo raquídeo.

Las vesículas poseen cavidades comunicadas entre sí que contienen líquido cefalorraquídeo. Las cavidades del telencéfalo forman los ventrículos laterales, que se comunican a través de los agujeros interventriculares

(Monro) con la cavidad del diencéfalo, el tercer ventrículo (iii–v). La cavidad del mesencéfalo se conoce como acueducto cerebral y comunica el III–V con la cavidad común del metencéfalo y el mielencéfalo, el cuarto ventrículo (IV–V). El iv–v se comunica con el espacio subaracnoideo a través de los agujeros laterales (Luschka) y el agujero medial (Magendie).

La porción caudal del neurotubo —debajo de la acodadura cervical— se transforma en el cordón espinal. Con el crecimiento de las paredes del cordón espinal, el volumen de la cavidad del neurotubo disminuye y se forma el conducto del epéndimo, que luego se oblitera.

En el desarrollo temprano, las vesículas están cubiertas por dos paredes: la zona ventricular y la zona marginal. La zona ventricular es la capa más interna y la marginal está en contacto con la piamadre. Una vez se ha desarrollado el neurotubo, se inicia la generación y diferenciación de neuronas y glía. Las células precursoras se localizan en la zona ventricular, que es una región de extraordinaria actividad mitótica.

Antiguamente, se pensaba que las neuronas y las células gliales del sistema nervioso central (SNC) se derivaban de células precursoras diferentes. Rudolf Virchow —quien sugirió por primera vez la presencia de células de soporte en el SNC en 1846 y las denominó células gliales— asumió que, al igual que otras células de soporte, la glía también tenía origen mesenquimatoso. Cuatro décadas después, Wilhelm His contradijo esta hipótesis al demostrar que las células gliales se originaban en el SNC. Sin embargo, His concluyó que las neuronas y la glía provenían de células precursoras diferentes. Este concepto se sostuvo durante la mayor parte del siglo pasado, y se propuso entonces que las neuronas provenían de los neuroblastos y la glía, de los espongioblastos. Para sorpresa de todos, estudios recientes han demostrado que algunas células consideradas parte del linaje glial —glía radial (GR)— son en realidad las células progenitoras neuronales (CP), que dan origen a neuronas diferenciadas y células gliales durante el desarrollo y en la etapa posnatal (figura 2.4).

Las CP generan neuronas y células gliales diferenciadas en forma directa o a través de células progenitoras intermedias (CPI), que pueden generar neuronas (CPI–n) o células gliales: astrocitos (CPI–a), oligodendrocitos (CPI–o) y células ependimarias. Se considera que la GR en realidad proviene del neuroepitelio pseudoestratificado de origen ectodérmico que tapiza las cavidades del neurotubo (figura 2.4). En el ser humano, se estima que en los momentos de máxima proliferación celular se generan 250 000 nuevas neuronas por minuto.

En la región caudal del neurotubo —que da origen al cordón espinal— se diferencian tres capas: la zona ventricular, la zona del manto y la zona marginal. La zona del manto contiene los cuerpos de las neuronas, que dan lugar a la sustancia gris. En la zona marginal están los axones de estas

neuronas, que conforman la sustancia blanca.

La evidencia reciente sugiere que la diferenciación neuronal se basa principalmente en la interacción célula–célula. Cuando las células precursoras trasplantadas son jóvenes, tienden a adquirir el fenotipo del tejido huésped. Si las células precursoras trasplantadas son viejas, por lo general retienen su fenotipo original.

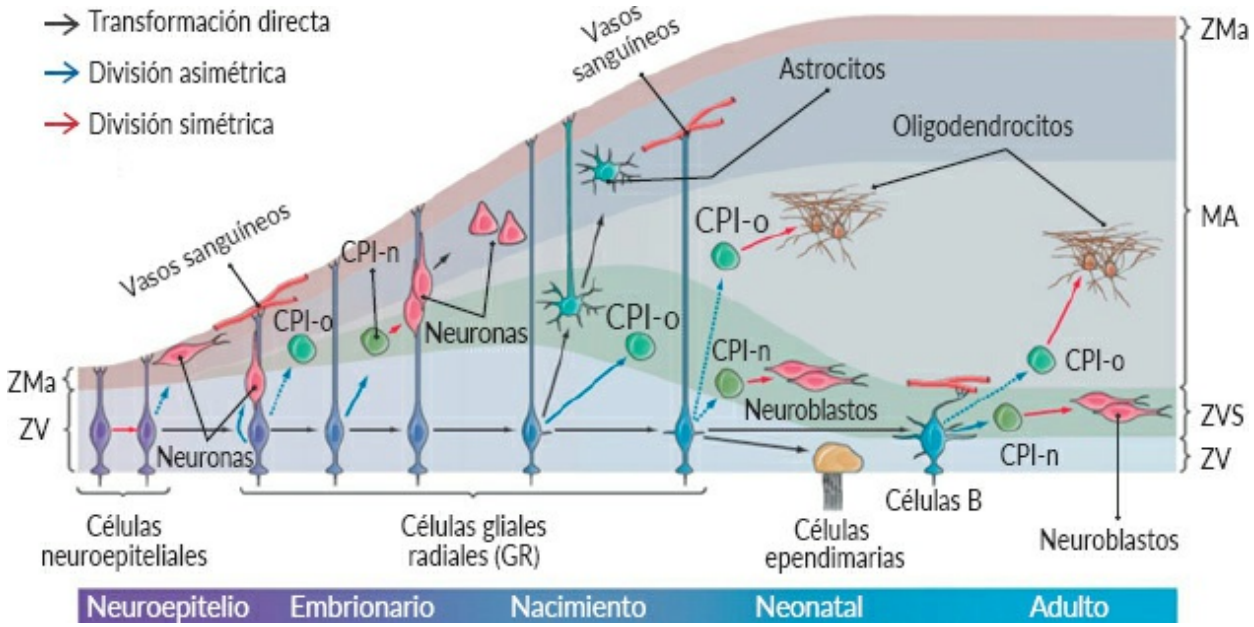


Figura 2.4. Esquema de la diferenciación celular neuronal. En el desarrollo temprano, las células neuroepiteliales se dividen para generar nuevas células neuroepiteliales y, después, se convierten en células de la glía radial (GR). Las células de la GR se dividen para generar neuronas en forma directa o a través de células progenitoras intermedias (CPI–n). Los oligodendrocitos se derivan también de la GR a través de células progenitoras intermedias (CPI–o). A medida que la progenie de células de la GR y células intermedias se dirige hacia el manto (MA), el encéfalo se engrosa. ZV: zona ventricular; MA: zona del manto; ZMa: zona marginal; ZVS: zona subventricular. **Fuente:** adaptada de (3).

MIGRACIÓN NEURONAL

Después de la mitosis final en la zona ventricular, la mayoría de neuroblastos o células precursoras neuronales viajan distancias considerables. La migración neuronal permite que neuronas de diferentes clases interactúen. Para las neuronas del SNC, esta migración se circunscribe al neurotubo; mientras que las neuronas del SNP, que provienen de la cresta neural, atraviesan diferentes ambientes embrionarios en su recorrido. Las células de la cresta neural son guiadas por moléculas de adhesión de la matriz extracelular o por moléculas de la superficie celular. Las neuronas del neurotubo son guiadas principalmente por la glía radial. La mayor parte de la glía radial desaparece durante los primeros días después del parto y se transforma en astrocitos maduros.

La formación de las láminas corticales en la corteza cerebral y cerebelosa depende de la reelina, una proteína extracelular codificada por el gen del cromosoma 7q22. Las neuronas del futuro tronco cerebral (mesencéfalo, puente y médula) se agrupan en columnas longitudinales somatomotoras, visceromotoras, somatosensitivas y viscerosensitivas. Una vez las neuronas alcanzan su destino final, dos cambios fundamentales en el desarrollo del sistema nervioso deben ocurrir: el crecimiento axonal y la formación de sinapsis.

CRECIMIENTO AXONAL

El cono de crecimiento axonal es una estructura altamente especializada que se encuentra en la porción distal del axón. Tiene gran movilidad y está encargado de explorar el medio ambiente extracelular para guiar la dirección del crecimiento axonal. El cono de crecimiento se expande mediante extensiones de tipo lamelar circular denominadas lamelipodios y prolongaciones digitiformes denominadas filopodios, que se forman y desaparecen rápidamente, manteniendo siempre contacto con el medio. Los filopodios contienen receptores que reaccionan —con atracción o repulsión— a las claves ambientales y así dirigen el crecimiento del axón. Los conos de crecimiento entran en contacto con moléculas específicas presentes en la superficie de las células o en la matriz extracelular (figura 2.5).

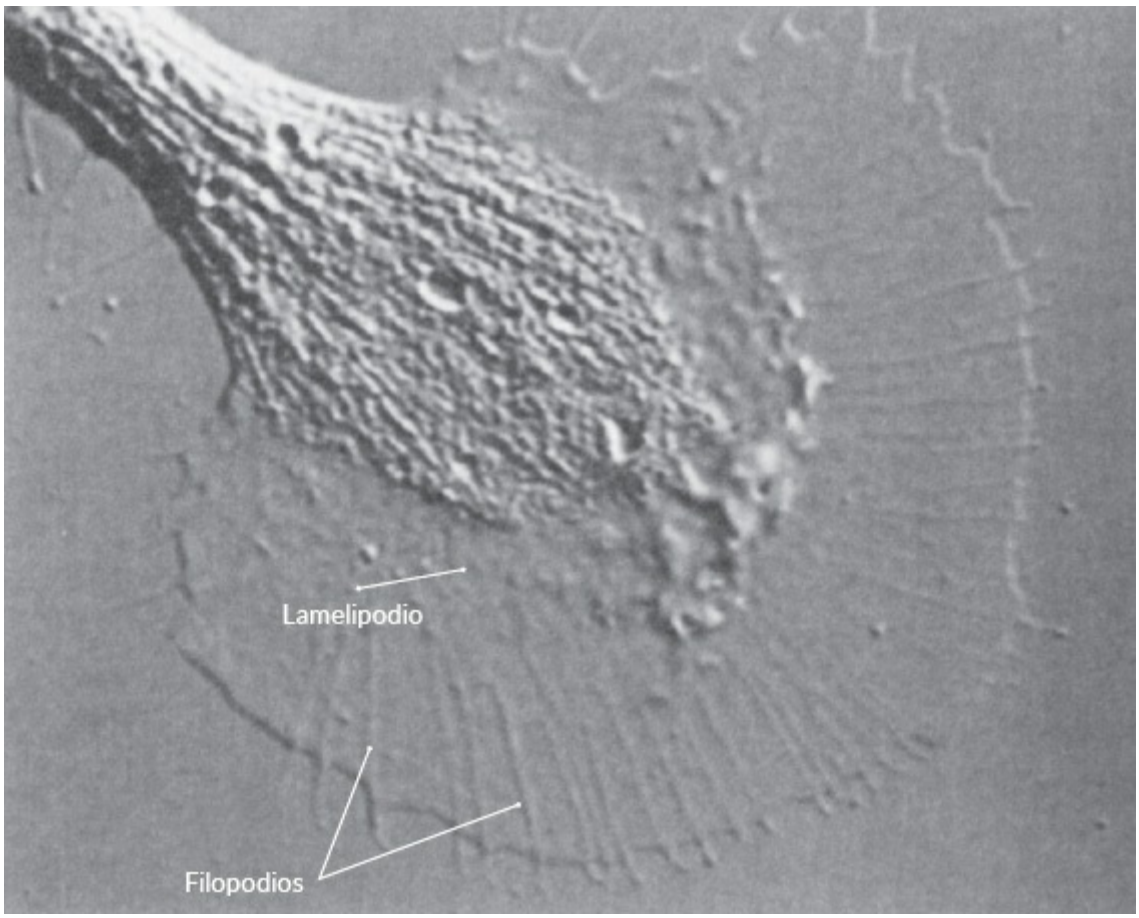


Figura 2.5. Microfotografía de un cono de crecimiento axonal. **Fuente:** adaptada de (4).

Signos no difusibles para el crecimiento axonal

Los receptores del cono axonal interactúan con moléculas localizadas en la superficie celular o en la matriz extracelular llamadas moléculas de adhesión celular (MAC). A su vez, estas interactúan con moléculas intracelulares. En la superficie celular se encuentra una clase de glicoproteínas dependientes del calcio denominadas cadherinas. Las cadherinas de la superficie celular convergen y se unen a moléculas idénticas de cadherinas en el cono de crecimiento. Otras moléculas de adhesión celular son las inmunoglobulinas —glicoproteínas no dependientes del calcio—, que están presentes en la superficie celular y se reconocen y unen con otras presentes en el cono de crecimiento.

Algunas moléculas de adhesión celular están localizadas en la matriz extracelular sin adherirse a las membranas de células embrionarias. Las más estudiadas son las lamininas, colágenos y fibronectinas, que se unen a un grupo específico de receptores del cono axonal conocidos como integrinas. La unión de las lamininas, colágenos y fibronectinas con las integrinas desencadena una serie de eventos dentro del cono axonal que estimulan su crecimiento y elongación. Por ejemplo, la actina predomina en los filopodios,

mientras que la tubulina es la proteína predominante en los lamelipodios. La actina globular (actina G) se incorpora a la actina–F y dirige el filopodio hacia las claves atractivas. Las claves repulsivas producen un flujo retrógrado de la actina–G hacia el lamelipodio.

La dirección tomada por el axón es influenciada también por signos inhibitorios que previenen el crecimiento axonal. Estos signos o moléculas se pueden localizar en la superficie celular y en la matriz extracelular. Un ejemplo de estas moléculas son las semaforinas, cuyos receptores en el cono de crecimiento son las inmunoglobulinas.

Para entender mejor este proceso se puede considerar el siguiente caso. En los mamíferos, los axones de las células ganglionares de la retina son distribuidos en capas específicas en el cuerpo geniculado lateral (CGL). Recientemente, se ha descrito la presencia de una molécula llamada efrina, que guía los axones de las neuronas ganglionares en la retina hacia las diferentes capas de los cuerpos geniculados laterales. Las efrinas son repelentes, es decir, previenen que axones o neuronas entren en territorios no apropiados, de manera que estabilizan los patrones de organización tisular. De este modo, las respuestas positivas y las respuestas a los signos inhibitorios por parte del cono axonal determinan la extensión y dirección del crecimiento axonal.

Signos difusibles para el crecimiento axonal

Otras moléculas que influyen en el crecimiento axonal son las que secretan las células blanco (destino final) y que llegan hasta el cono de crecimiento axonal. Las moléculas mejor caracterizadas dentro de este grupo son las netrinas (del término sánscrito para «guiar»). Las netrinas actúan en los sitios del sistema nervioso en desarrollo donde los axones deben escoger si cruzan la línea media o permanecen en el mismo lado, como es el caso del haz espinotalámico ventrolateral, el quiasma óptico, el cuerpo calloso y la decusación del nervio troclear. Estos signos de quimioatracción ayudan a organizar la mayoría de las vías cruzadas en el SNC.

En la construcción del sistema nervioso también participan moléculas que le indican al cono de crecimiento axonal adónde no debe ir. Entre estas moléculas quimiorrepelentes, se encuentran las semaforinas (del griego semaphor: signo), que se localizan en la superficie celular o en la matriz extracelular e inhiben la extensión de los axones vecinos. Con la misma función, existen las células que intervienen en la producción de mielina. Al parecer, estas células juegan un papel importante en la inhibición del crecimiento axonal después de cualquier trauma ocasionado al sistema nervioso adulto.

FORMACIÓN DE SINAPSIS

Una vez los axones alcanzan su destino final, deben determinar cuál(es) célula(s) inervar. Por la complejidad de este fenómeno, la mayoría de los estudios se han realizado en el SNP. Las sinapsis requieren una organización precisa de los elementos pre y postsinápticos para funcionar de forma adecuada. El momento crítico en la formación de una sinapsis toma lugar cuando el cono de crecimiento axonal hace contacto con la fibra muscular en desarrollo. El cono de crecimiento axonal se transforma en terminal nerviosa y la región del músculo que está en contacto con esta (región postsináptica) empieza a desarrollar propiedades específicas, como la activación de genes que codifican subunidades del receptor de acetilcolina. En la sinapsis neuromuscular, la aGRina juega un papel fundamental. La agrina es un proteoglicano que se encuentra en las motoneuronas, en los músculos de los mamíferos y en el tejido cerebral. La agrina es sintetizada en las motoneuronas; luego es transportada y liberada por el axón; después se une a los receptores postsinápticos y, al activarse, produce agrupamiento de receptores para acetilcolina.

Dentro de los desórdenes de la neurulación (defectos del tubo neural) se incluyen la craneorraquisquisis (exposición de todo el sistema nervioso), el mielomeningocele (exposición del cordón espinal con protrusión de las meninges) y la espina bífida oculta. El diagnóstico prenatal de los defectos del tubo neural se realiza midiendo los niveles de la alfa fetoproteína durante el primer trimestre de gestación. El uso de algunos anticonvulsivantes y la deficiencia de ácido fólico se han asociado a la patogénesis de los defectos del tubo neural. Entre los desórdenes de la migración neuronal, el más frecuente es la heterotopía, que ocurre cuando grupos de neuronas morfológicamente normales se ubican en un sitio anormal. La manifestación más frecuente es la presencia de crisis convulsivas.

EJERCICIOS CLÍNICOS

Caso 1

Un niño de 9 años manifiesta crisis convulsivas de difícil control. El uso de múltiples medicamentos anticonvulsivantes es inefectivo. Por esta razón, se realizan las IRM presentadas en la figura 2.6.

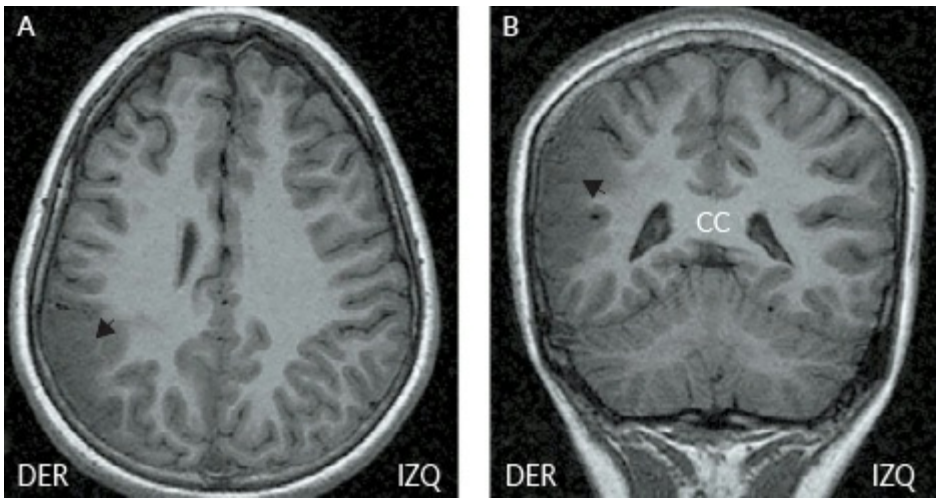
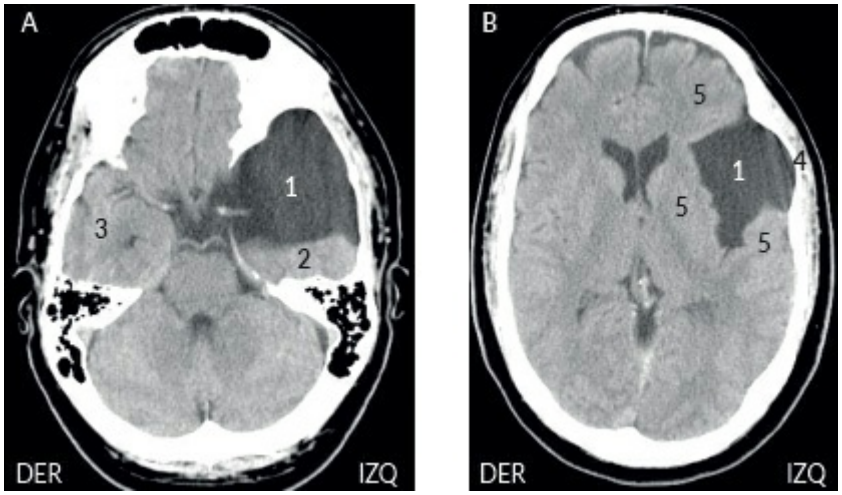


Figura 2.6A. IRM en T1 (T1–WI) de corte transversal cerebral que muestra en la región frontoparietal derecha una lesión cortical (►) compatible con heterotopía.
Figura 2.6B. IRM en T1 (T1–WI) de corte coronal cerebral que muestra un hallazgo similar al de la figura anterior (►). CC: cuerpo calloso.

Caso 2

Un paciente de 46 años ingresa al servicio de urgencias por cefalea de varios días de evolución. Se realiza TAC cerebral simple (figura 2.7) que muestra, como hallazgo incidental, quiste aracnoideo gigante por alteración en el desarrollo del hemisferio izquierdo. El paciente no presenta alteraciones neurológicas derivadas de esta anomalía.



Figuraa 2.7A. TAC cerebral simple que muestra lesión quística con líquido cefalorraquídeo (1) y lóbulo temporal izquierdo (2) que no se desarrolló en forma similar al lóbulo temporal derecho (3).
Figura 2.7B. TAC cerebral simple que muestra lesión quística (1) que deforma el díploe interno del cráneo (4) y hemisferio izquierdo (5) poco desarrollado (hipoplásico).

Caso 3

Un bebé de 10 meses de edad presenta retraso en el desarrollo

neuroconductual. Por esta razón, se realiza IRM cerebral simple (figura 2.8).

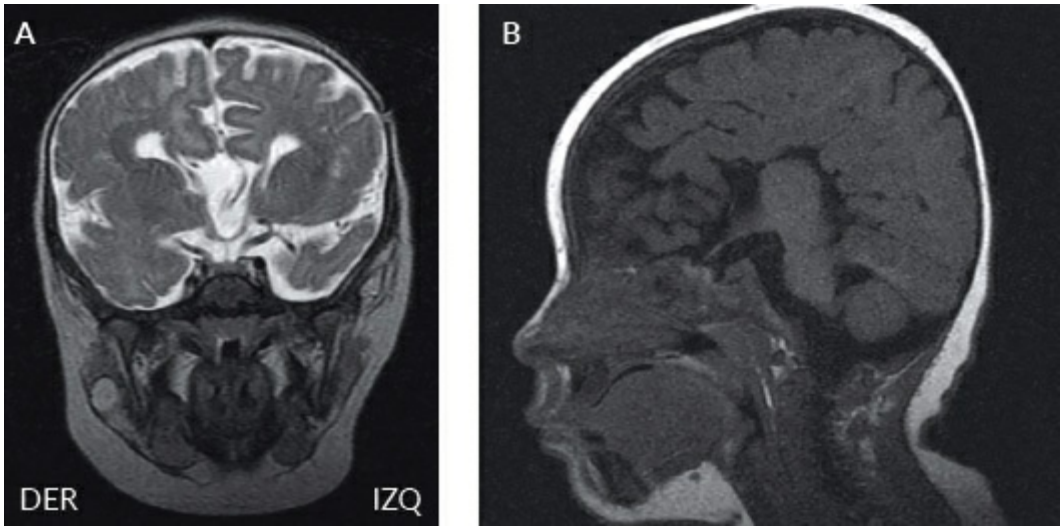


Figura 2.8A. IRM en T2 (T2–WI) de corte coronal cerebral en la que se aprecia ausencia del cuerpo calloso (agenesia del cuerpo calloso). Compárese esta imagen con la figura 2.6B.
Figura 2.8B. IRM en T1 (T1–WI) de corte sagital cerebral en la que se aprecia ausencia del cuerpo calloso. Compárese esta imagen con la figura 1.16B. Se sugiere al lector investigar sobre los efectos que produce esta anomalía en el desarrollo.

REFERENCIAS

1. Siegel A, Sapru H. Essential neuroscience. 2.ª ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2009.
2. Heimer L. The human brain and spinal cord. Functional neuroanatomy and dissection guide. 2.a ed. New York: Springer–Verlag; 1995.
3. Kriegstein A, Alvarez–Buylla A. The glial nature of embryonic and adult neural stem cells. Annu Rev Neurosci. 2009;32:149–84.
4. Purves D, Augustine G, Fitzpatrick D, Katz L, La Mantia AS, McNamara J, editores. Neuroscience. 2.ª ed. Sunderland: Sinauer Associates; 2001.

LECTURAS RECOMENDADAS

1. Bear M, Connors B, Paradiso M. Neuroscience. Exploring the brain. 4.ª ed. Philadelphia: Wolters Kluwer; 2016.
2. Shamji M, Ibrahim A. Cervical meningocele. N Eng J Med. 2015; 373:e4.

CAPÍTULO 3

HISTOLOGÍA DEL SISTEMA NERVIOSO

En el parénquima del sistema nervioso se distinguen dos grupos principales de células: las neuronas y las células gliales. Además, se pueden identificar células de tejidos vasculares, de sostén y del sistema inmune. Para el adecuado funcionamiento del sistema nervioso es necesario que todos estos tipos celulares actúen de forma coordinada.

NEURONAS

Las neuronas son las células efectoras del sistema nervioso; es decir, están encargadas de procesar información de estímulos externos e internos y escoger la mejor respuesta motora y emocional para estos. Las neuronas son células altamente polarizadas cuya estructura se divide en tres regiones: las dendritas, que reciben la información; el cuerpo celular, también llamado soma; y el axón, encargado de transmitir la información procesada a otras neuronas o células efectoras (figura 3.1).

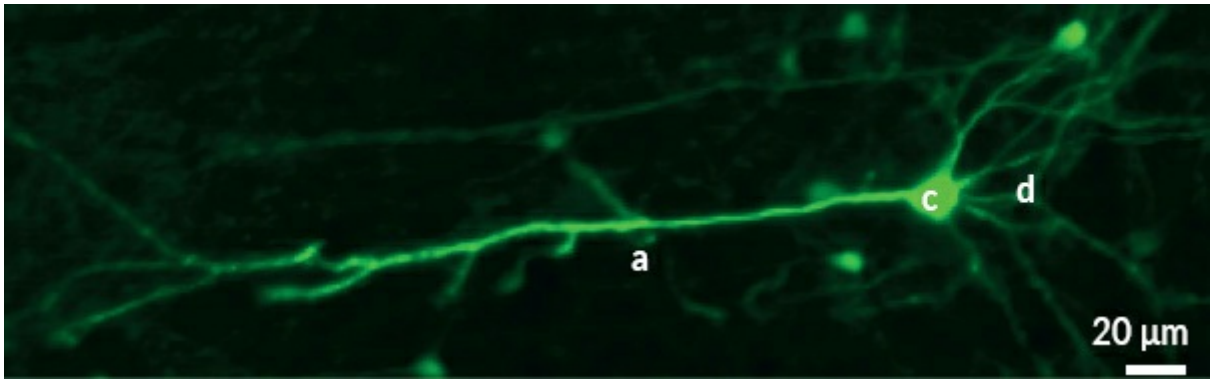


Figura 3.1. Neurona piramidal de la región CA1 de la formación hipocampal del ratón. La neurona expresa un fluoróforo verde que permite su visualización usando un microscopio fluorescente. Se observa el cuerpo celular (c), múltiples dendritas cortas (d) y un axón (a) de gran extensión comparado con las dendritas. **Fuente:** cortesía del Dr. José Esteban, Centro de Biología Molecular Severo Ochoa.

Las dendritas son ramificaciones del cuerpo celular ricas en receptores de neurotransmisores y neuropéptidos, que son sustancias químicas transmisoras de información liberadas por otras neuronas o por células especializadas en detectar estímulos sensoriales. Los receptores suelen estar

agrupados en estructuras esféricas llamadas espinas dendríticas (figura 3.2). Cuando los neurotransmisores activan los receptores en las espinas causan un cambio local en el potencial de membrana. Ese cambio de potencial se transmite de forma pasiva hacia el cuerpo celular y se suma a los cambios generados en otras dendritas por la activación de los receptores de sus espinas.

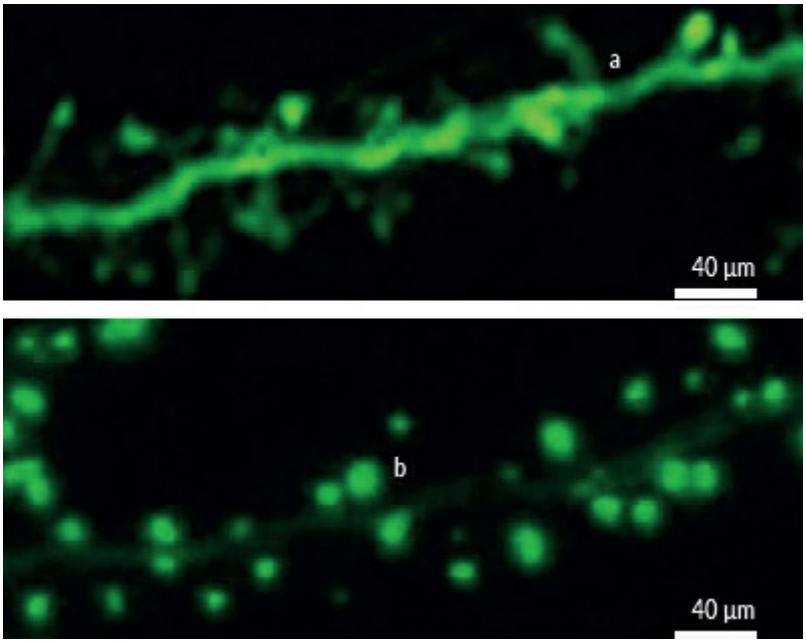


Figura 3.2. Ampliación de las dendritas de la figura 3.1. Es posible observar las espinas dendríticas (a), que son más visibles cuando tienen mayor concentración de fluoróforo (b). **Fuente:** cortesía del Dr. José Esteban, Centro de Biología Molecular Severo Ochoa.

El cuerpo de las neuronas contiene el núcleo y la mayoría de los organelos celulares. Las neuronas tienen uno de los metabolismos celulares más activos en el cuerpo, por lo que las enfermedades que afectan algún organelo celular —mitocondria, lisosoma, peroxisoma, citoesqueleto— tienden a presentar síntomas neurológicos. El retículo endoplasmático rugoso es particularmente abundante en el soma de las neuronas, de manera que las tinciones que reconocen este organelo —por ejemplo, la tinción de Nissl— se usan para identificar cuerpos neuronales. Los cuerpos neuronales no están ubicados de forma aleatoria en el sistema nervioso, sino que se agrupan y forman una región conocida como sustancia gris. En la sustancia gris, los cuerpos neuronales tienden a organizarse en cúmulos esféricos u ovoides, que reciben el nombre de núcleos en el snc o ganglios en el snp. También pueden conformar capas, como en las cortezas cerebrales y cerebelosas y el giro dentado del hipocampo. La sustancia gris que se encuentra en las superficies del cerebro y el cerebelo recibe el nombre de corteza cerebral y corteza cerebelosa, respectivamente. Para ilustrar mejor este concepto, la figura 3.3 presenta un corte histológico de la corteza cerebelosa.

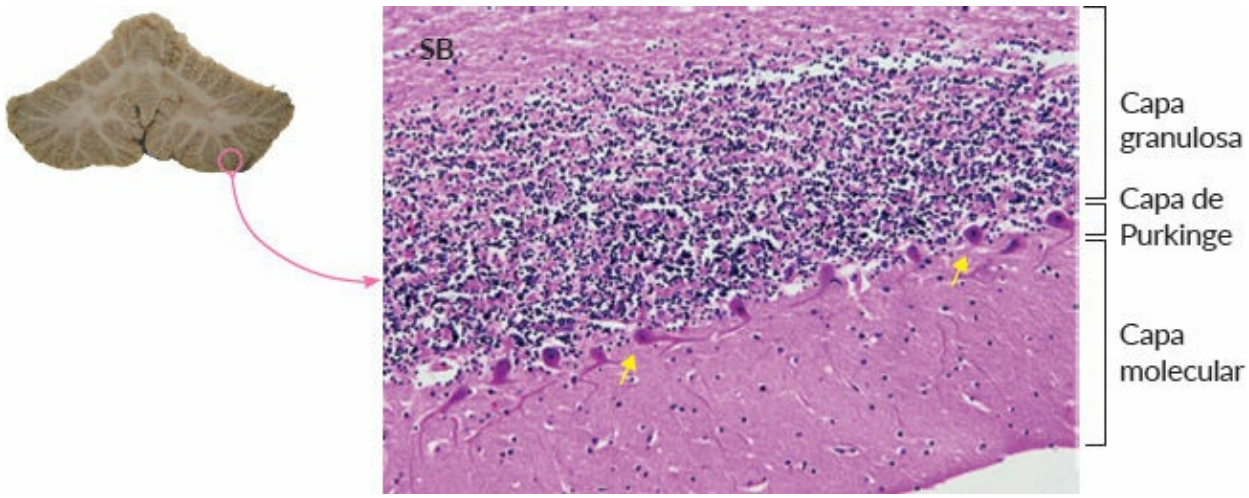


Figura 3.3. Microscopía de luz con tinción de hematoxilina–eosina de la corteza cerebelosa. Se observa la capa molecular adyacente a la piamadre, la capa granulosa adyacente a la sustancia blanca (SB) y entre estas dos, la capa de las células de Purkinge (▶), en la que se pueden apreciar las prolongaciones dendríticas. **Fuente:** pieza histológica cortesía del Dr. Pedro Franco, Departamento de Morfología, Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia.

Si bien las neuronas tienden a tener múltiples dendritas, por lo general, solo tienen un axón, que presenta múltiples ramificaciones en su porción terminal. En cada una de estas ramificaciones existen diversas vesículas cargadas, generalmente, de un neurotransmisor y varios neuropéptidos, que son químicos transmisores de información. Las características exactas de ambos dependen del tipo de neurona. Las ramificaciones de la terminal axonal permiten que una neurona transmita información a otras neuronas, a células musculares o a células exo y endocrinas. La longitud de los axones es muy variable. Existen unos cortos que transmiten información a otras neuronas de la misma región. Hay otros que comunican diferentes regiones de la sustancia gris, recorriendo áreas donde no hay cuerpos neuronales. Estos están recubiertos de mielina (fibras nerviosas) y se organizan en paquetes denominados tractos o fascículos, que asemejan los cables de un circuito eléctrico. Las agrupaciones de fibras nerviosas mielinizadas forman la sustancia blanca. Los núcleos del SNC son áreas de sustancia gris inmersas en sustancia blanca.

En la membrana celular del soma y el axón también existen receptores para neurotransmisores y neuropéptidos, pero en menor cantidad que en las dendritas. A nivel del citoesqueleto, los filamentos de actina e intermedios se encuentran en las dendritas, el soma y los axones; pero los microtúbulos solo se encuentran en el axón. Dado que las neuronas no se reproducen, no necesitan husos mitóticos, que estarían hechos de microtúbulos. Muchas de las proteínas y neurotransmisores que se utilizan en la terminal axonal se sintetizan en el soma y se transportan a esta. Debido a la longitud de los axones, la difusión pasiva de estas sustancias entre el soma y la terminal axonal debería tomar mucho tiempo. Sin embargo, la neurona ha solucionado este dilema mediante el proceso de transporte axonal, en el que diferentes

complejos proteicos se adhieren al producto que se quiere transportar y a los microtúbulos. Las proteínas capaces de degradar ATP en el complejo utilizan la energía generada para deslizar todo el complejo a lo largo del microtúbulo. Existen complejos especializados para transportar productos desde el soma hacia la terminal axonal (transporte anterógrado) y otros para ir en sentido opuesto (transporte retrógrado).

La región del cuerpo celular donde se origina el axón se conoce como cono axonal. Los cambios locales en el potencial de membrana que ocurren en las dendritas y en el soma se suman en el cono axonal. Si esa suma resulta en un potencial positivo (depolarización) por encima de un valor mínimo —o umbral, que es diferente para los distintos tipos neuronales—, en el cono axonal, se produce un cambio del potencial de membrana hacia valores altamente positivos llamado potencial de acción (figura 3.4). El potencial de acción viaja a través del axón; pero, a diferencia de los cambios de potencial locales en las dendritas y el soma, este no se transmite de forma pasiva, sino que se regenera continuamente para viajar largas distancias.

Para incrementar la velocidad de transmisión y reducir el costo energético de la regeneración del potencial de acción, algunos axones están recubiertos por una capa de lípidos llamada mielina, que determina el color de la sustancia blanca (figuras 3.3 y3.5). Al llegar a la terminal axonal, el potencial de acción hace que los canales de calcio de la membrana celular se abran y que el calcio libre ingrese a la terminal. El calcio genera la fusión de las vesículas cargadas de neurotransmisores y neuropéptidos con la membrana celular, liberando las señales químicas al espacio extracelular entre la terminal axonal y la membrana de otras células o las espinas dendríticas de otra neurona.

La combinación de una terminal axonal, la dendrita de otra neurona y el espacio extracelular entre ambas se llama sinapsis química o solo sinapsis en la mayoría de la literatura. La neurona que libera el neurotransmisor se denomina neurona presináptica; la neurona cuya dendrita detecta el neurotransmisor es la neurona postsináptica, y la extensión entre las dos es el espacio sináptico (figura 3.6). Las sinapsis compuestas de una neurona presináptica y una célula muscular postsináptica se denominan uniones neuromusculares. En muchas ocasiones, las dendritas de la neurona postsináptica no solo cambian su potencial de membrana en respuesta a los neurotransmisores liberados por la neurona presináptica, sino que también pueden liberar factores de crecimiento y neuropéptidos al espacio sináptico. Estas sustancias cruzan el espacio sináptico y actúan sobre receptores en la terminal axonal de la neurona presináptica. Las sustancias que viajan en sentido retrógrado tienen dos funciones:

1. Prevenir que la neurona presináptica libere mucho neurotransmisor.
2. Prevenir la apoptosis de las neuronas presinápticas, ya que las neuronas

que no forman sinapsis funcionales con otras células entran en un proceso de muerte programada.

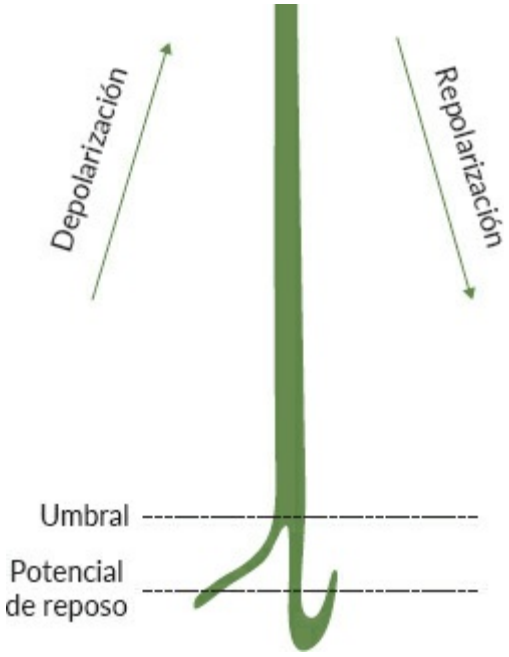


Figura 3.4. Esquema del potencial de acción de una neurona granular del cerebelo de un ratón. La depolarización depende principalmente de canales de sodio, mientras que la repolarización e hiperpolarización dependen de canales de potasio. **Fuente:** cortesía de la Dra. Lori Isom, Departamento de Farmacología, Universidad de Michigan.

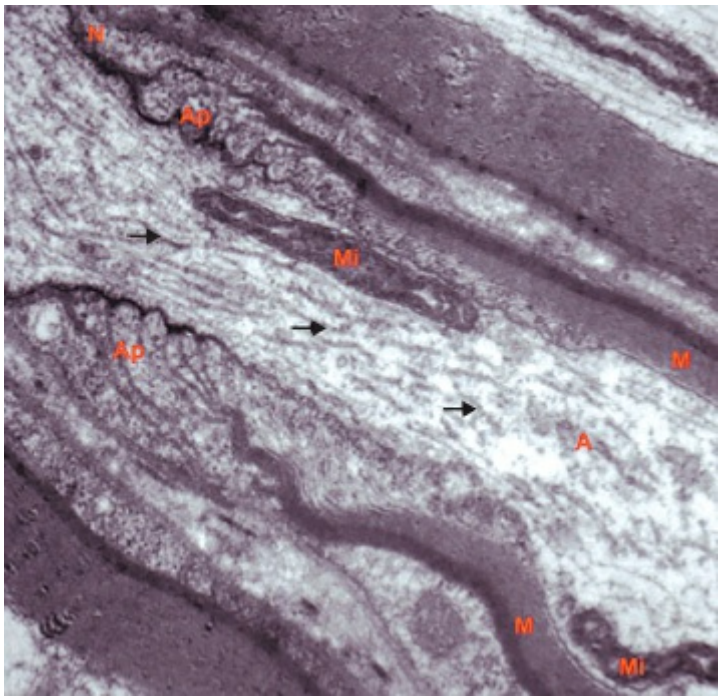


Figura 3.5. Micrografía electrónica de nervio ciático de ratón. Se observa un axón (A), rodeado por la capa de mielina (M). Al interior del axón son evidentes algunas mitocondrias (Mi) y abundantes microtúbulos (►). La capa de mielina se ancla a la membrana axonal por medio de las asas paranodales (Ap) —formando el paranodo— y deja descubierta una región denominada el nodo de Ranvier (N). **Fuente:** cortesía de la Dra. Lori Isom, Departamento de Farmacología, Universidad de Michigan.

Otro tipo de comunicación neuronal es la sinapsis eléctrica, en la que los citoplasmas de las neuronas pre y postsináptica están fusionados mediante canales de membrana llamados uniones gap. Esta sinapsis permite que los cambios de voltaje en la membrana de una neurona se transmitan a la otra a mayor velocidad que mediante sinapsis química. Como el cambio de voltaje puede difundirse en cualquier dirección, cualquiera de las neuronas puede ser la presináptica en una sinapsis eléctrica.

En una microscopía de luz se pueden diferenciar las dendritas, el soma y el axón porque cada uno posee proteínas u organelos celulares específicos. En las dendritas se encuentran las proteínas β III tubulina, MAP2 y doble cortina, así como los componentes de las espinas dendríticas. El cuerpo celular normalmente se reconoce por la presencia del retículo rugoso endoplasmático, usando tinción de Nissl, o del núcleo, y marcadores para ácidos nucleicos o para factores de transcripción. Como se mencionó antes, estas tinciones se pueden usar para localizar núcleos o cortezas en el SNC y para identificar la organización de los mismos. Finalmente, el axón presenta las proteínas Tau1 y ankirina G de forma exclusiva. Al identificar sus distintos componentes, las neuronas se pueden clasificar en: multipolares, que tienen un axón y múltiples dendritas protruyendo del soma; bipolares, que poseen solo un axón y una dendrita extendiéndose del soma; y pseudomonopolares, en las que el soma genera una sola proyección que luego se divide en una prolongación axonal y una dendrítica. También se pueden usar anticuerpos contra las enzimas que generan los distintos neurotransmisores o contra los mismos neurotransmisores y neuropéptidos, para saber qué sustancias liberan las neuronas en una región del sistema nervioso.

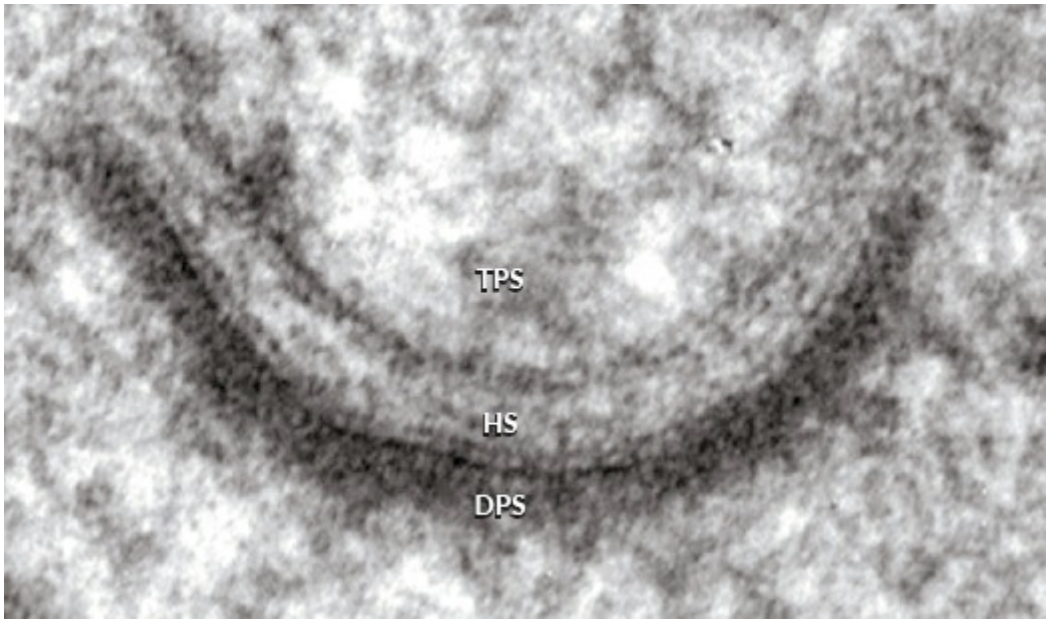


Figura 3.6. Micrografía electrónica de una sinapsis. En la parte superior se encuentra la terminal presináptica (TPS), probablemente un axón, seguida de la hendidura sináptica (HS) y luego la terminal postsináptica, donde se observa claramente la densidad postsináptica (DPS). **Fuente:** cortesía del Dr. José Esteban, Centro de Biología Molecular Severo Ochoa.

GLÍA

Las células gliales se encargan de mantener la homeostasis del sistema nervioso, asegurando un ambiente adecuado para la función neuronal. Este grupo se compone de los siguientes tipos de células:

Astrocitos: son las células más abundantes en el sistema nervioso central, y ejercen múltiples funciones para asegurar la homeostasis neuronal. Morfológicamente, tienen abundante citoplasma, un prominente núcleo pálido y múltiples prolongaciones que se ramifican profusamente (figura 3.7).

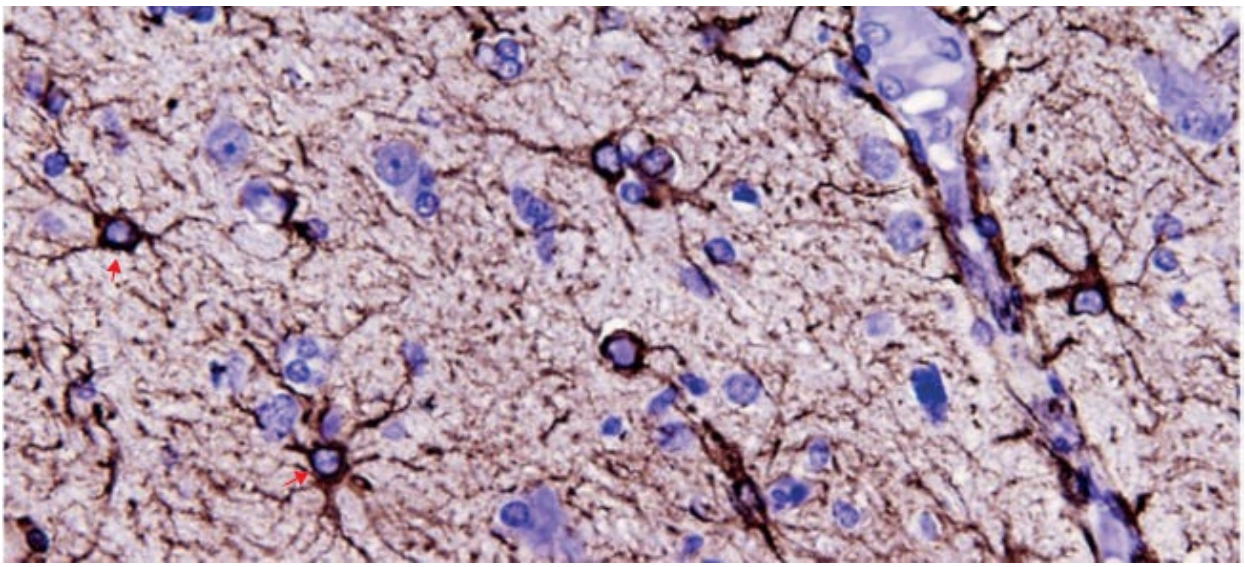


Figura 3.7. Pieza histológica con coloración de inmunohistoquímica para proteína glial fibrilar. Se aprecian varios astrocitos (▶) con múltiples prolongaciones citoplasmáticas que se ramifican profusamente. **Fuente:** cortesía del Dr. Pedro Franco, Departamento de Morfología, Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia.

Los astrocitos se encuentran por todo el SNC, especialmente, en las interfaces del parénquima neural y otros tejidos. Entre sus funciones se destacan:

1. Rodear las sinapsis químicas y controlar sus concentraciones locales de neurotransmisores, iones y agua.
2. Dar estabilidad estructural a las sinapsis mediante la interacción de las proteínas de adhesión presentes en las membranas. Interacciones similares en el parénquima sirven para dar estabilidad estructural dentro del SNC. Asimismo, los astrocitos se encargan de producir y mantener la matriz extracelular en el SNC.
3. Rodear los vasos sanguíneos del sistema nervioso para formar una

barrera que controle el paso de sustancias y células al parénquima nervioso. Esta barrera se denomina barrera hematoencefálica y se compone de astrocitos, células endoteliales del vaso sanguíneo, la lámina basal entre ambos tipos celulares, y los pericitos inmersos en la lámina basal.

4. Controlar la permeabilidad capilar de los vasos que rodean y acoplarla a los requerimientos metabólicos del sistema nervioso.
5. Almacenar glucógeno y ATP. Las neuronas no son capaces de almacenar energía y, en períodos de alta demanda metabólica, dependen de los astrocitos.
6. Almacenar y liberar gliotransmisores, que son sustancias excitatorias de las neuronas cercanas. Entre los gliotransmisores mejor caracterizados están el ATP, el glutamato, la adenosina, la D–serina y los eicosanoides.
7. Durante el desarrollo del sistema nervioso, los astrocitos juegan un papel importante en la diferenciación de las células madre a neuronas, y en la formación inicial de sinapsis.
8. En caso de daños al sistema nervioso, los astrocitos pueden iniciar y mantener una respuesta inflamatoria —activando células inmunes— o una respuesta cicatricial —produciendo matriz extracelular—.

Los astrocitos expresan las proteínas S100B y glial fibrilar (GFAP, por su sigla en inglés), que son los marcadores clásicos para este tipo celular.

Oligodendrocitos: son las células encargadas de formar la mielina en el SNC (figura 3.8). Para formar la mielina, un oligodendrocito produce una proyección de su membrana celular y la enrolla varias veces alrededor de un segmento axonal. Como resultado, múltiples capas de membrana celular del oligodendrocito quedan superpuestas —sin citoplasma entre ellas— alrededor del axón. Las moléculas de adhesión presentes en la membrana celular del oligodendrocito interactúan con las moléculas de adhesión presentes en las porciones superpuestas de la misma membrana o en la membrana celular de la neurona adyacente, con el fin de dar estabilidad al recubrimiento de mielina. Cada oligodendrocito del SNC suele mielinizar múltiples segmentos axonales de distintas neuronas, mientras que un axón suele necesitar múltiples oligodendrocitos para cubrir su longitud total. Entre dos segmentos axonales cubiertos por oligodendrocitos (mielinizados) existe una región no mielinizada, que corresponde a las áreas donde el potencial de acción es regenerado en camino a la terminal axonal. Esas regiones no mielinizadas entre dos segmentos mielinizados se llaman nodos de Ranvier (figuras 3.5 y 3.9).

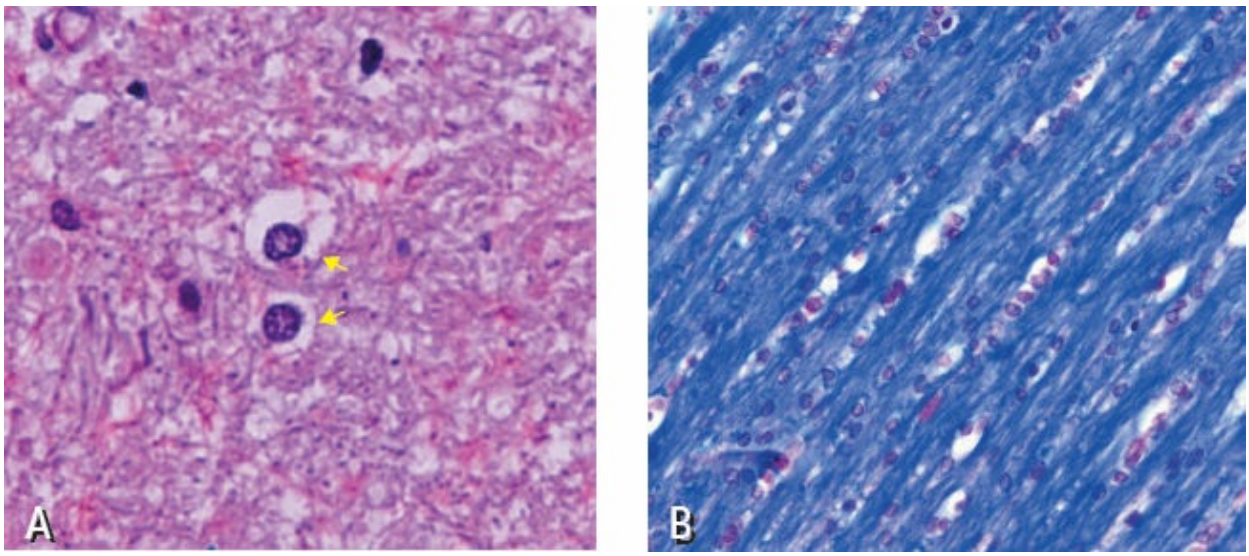


Figura 3.8A. Pieza histológica por microscopía de luz. Se aprecian oligodendrocitos (►) en coloración de hematoxilina–eosina, en los que se identifican los núcleos redondos de cromatina granular gruesa. Las vacuolas perinucleares que corresponden al citoplasma están aumentadas en parte por artificios de fijación.

Figura 3.8B. Oligodendrocitos fasciculares en coloración de Luxol fast blue para mielina, 40X. Se observa la organización en fila india de los oligodendrocitos fasciculares de la región parahipocampal. La mielina aparece teñida de color azul. **Fuente:** cortesía del Dr. Pedro Franco, Departamento de Morfología, Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia.

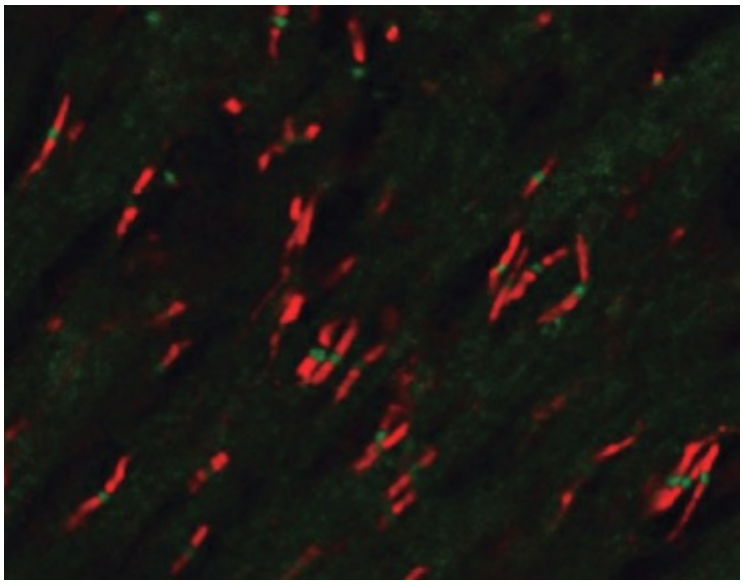


Figura 3.9. Pieza histológica de nodos y paranodos del nervio óptico de un ratón. Se observan múltiples axones (teñidos tenuemente de color verde en el fondo) con múltiples nodos de Ranvier (en verde intenso) rodeados por paranodos (en rojo). La tinción del nodo está dada por canales de sodio y la del paranodo por la proteína Caspr. **Fuente:** cortesía de la Dra. Lori Isom, Departamento de Farmacología, Universidad de Michigan.

Cuando hay un daño en la mielina, el potencial de acción puede degradarse antes de cubrir la distancia entre dos nodos de Ranvier, y la neurona no podrá liberar sus neurotransmisores y neuropéptidos. La mielina permite que el potencial pueda viajar esa distancia sin debilitarse.

De igual manera, el axón expuesto puede perder su capacidad de controlar el flujo de iones a través de la membrana celular, lo que puede resultar en daño axonal e incluso muerte neuronal.

Al igual que las neuronas y los astrocitos, los oligodendrocitos son de origen ectodérmico y se derivan de células madre neurales. Los precursores de oligodendrocitos son las últimas células en diferenciarse de las células madre, y el proceso de mielinización es bastante lento. Hay regiones del cerebro que no terminan de mielinizarse sino hasta la tercera década de la vida.

La mielina se puede teñir con coloración de Luxol fast blue o de Loyez. En los textos y artículos de neuroanatomía, es común presentar la organización del SNC mediante figuras teñidas con tinción de Loyez, para mostrar los tractos de la sustancia blanca (axones mielinizados en negro), y tinción de Nissl, para mostrar los cuerpos neuronales en la sustancia gris.

Células de Schwann: son las encargadas de formar la mielina en el snp. Todos los axones en el snp están cubiertos por células de Schwann, pero no todos están mielinizados. Los axones no mielinizados están rodeados por proyecciones de la membrana celular y el citoplasma de las células de Schwann. A diferencia de los oligodendrocitos, las células de Schwann que forman mielina solo mielinizan un segmento axonal (figura 3.10).

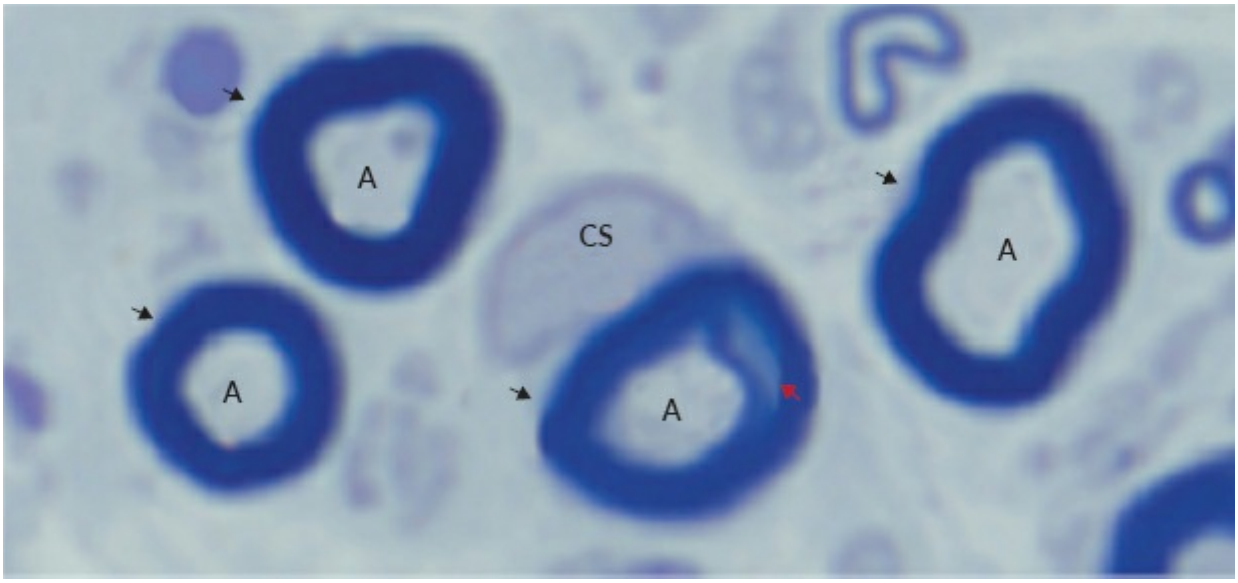


Figura 3.10. Tinción de nervio sural humano. Se observan los axones (A) rodeados por la capa de mielina (►). Alrededor de uno de los axones se observa una célula de Schwann (CS) y una cisterna de Schmidt–Lantermann (►), que corresponde al citoplasma de la célula de Schwann. **Fuente:** cortesía de la Dra. Eva Feldman, Departamento de Neurología, Universidad de Michigan.

Microglía: son células pequeñas distribuidas por todo el SNC. Tienen una morfología altamente ramificada y son capaces de secretar factores neurotróficos. Bajo estas condiciones, una función de la microglía es fagocitar neuronas que normalmente mueren durante el transcurso de la

vida, especialmente en el período posnatal, cuando la mitad de las neuronas con las que nace un individuo sufren apoptosis. Cuando ocurre un daño del SNC, la microglía es activada por proteínas foráneas o citoquinas secretadas por astrocitos o linfocitos, y adquiere una morfología ameboide y la capacidad de migrar a través del parénquima, presentar antígenos y producir citoquinas. La secreción de las citoquinas contribuye a generar una reacción inflamatoria localizada. Por este motivo, se dice que la microglía es la célula inmune del SNC, pero se desconoce si la presencia de esa inflamación local tiene algún beneficio inicial o si siempre es nociva.

La microglía se deriva de las células madre mesenquimales. La mayoría de las células microgliales del SNC ingresan al parénquima durante el desarrollo fetal, antes de que se desarrolle la barrera hematoencefálica. Durante la vida posnatal, se generan células microgliales ocasionales en la periferia —posiblemente en la médula ósea—, que cruzan la barrera hematoencefálica para entrar al parénquima.

Células madre neurales: la mayoría de las neuronas, astrocitos y oligodendrocitos del SNC se generan al momento de nacer y casi todas las células madre neurales desaparecen, con la excepción de dos regiones: la zona subventricular y el giro dentado del hipocampo. La primera genera neuronas para el bulbo olfatorio; la segunda origina neuronas que sirven para generar nuevas memorias en el giro dentado. Con el paso de los años, estas células madre pierden su capacidad proliferativa y mueren, lo que explica parcialmente que al envejecer sea común la disminución en la capacidad olfatoria y de memoria. En el SNC, durante la vida posnatal, algunos astrocitos, oligodendrocitos y células microgliales conservan la capacidad de proliferarse, pero las neuronas solo pueden generarse a partir de las células madre neurales.

Epitelio coroideo: el sistema nervioso se encuentra suspendido en el líquido cefalorraquídeo (LCR). La mayor parte del LCR se produce en los cuerpos coroideos, que son protrusiones en los ventrículos cerebrales compuestas por vasos sanguíneos rodeados por una matriz de tejido conectivo y delimitadas por una capa de epitelio cuboide llamado epitelio coroideo. El epitelio coroideo se encarga de secretar la mayoría del LCR al espacio ventricular a través de abundantes microvellosidades en su membrana apical. Se desconoce qué otras células del SNC producen LCR, pero se sabe que, en casos de tumores en los plexos coroideos, estos pueden ser removidos sin que la persona pierda la capacidad de generar LCR.

Células ependimarias: las paredes del espacio ventricular están cubiertas por células epiteliales ciliadas llamadas células ependimarias o, de forma colectiva, epéndima. Los cilios del epéndima se mueven constantemente y se cree que esto facilita la circulación del LCR. Los

tanicitos son células ependimarias que envían proyecciones a los vasos sanguíneos subyacentes en el parénquima neural que se localizan en el hipotálamo.

Células endoteliales: en comparación con otros órganos, las células endoteliales de los vasos sanguíneos que irrigan el sistema nervioso tienen características especiales: una ausencia de fenestras y una baja tasa de pinocitosis, lo que contribuye a la función de la barrera hematoencefálica. Estas características son inducidas en las células endoteliales por los astrocitos que hacen contacto con ellas. Dado que el endotelio de los vasos cerebrales es diferente al de otros órganos, los medicamentos que pueden ser útiles en el tratamiento de enfermedades de los vasos sanguíneos —por ejemplo, la arterioesclerosis— en otras circulaciones no siempre sirven para tratar los vasos cerebrales. Las células endoteliales presentan glicoproteína P en sus membranas, que se encarga de expulsar las sustancias extrañas que puedan haber ingresado a la célula endotelial. La presencia de la glicoproteína P en las células endoteliales del SNC explica en parte por qué es tan difícil desarrollar medicamentos que actúen en el SNC. Los demás elementos de la barrera hematoencefálica también contribuyen a esta dificultad.

Pericitos: son células mesenquimales que forman parte de la barrera hematoencefálica. Se encuentran inmersas en la matriz extracelular de la lámina basal, entre las células endoteliales de los capilares y los astrocitos. Los pericitos tienen capacidad contráctil y su función es controlar la dilatación o contracción de los capilares sanguíneos en el SNC según las órdenes que dan los astrocitos tras evaluar el nivel de activación neuronal. Como los capilares carecen de capa muscular, los pericitos ejercen una función equivalente.

Células inmunes: además de la microglía, otras células inmunes pueden estar presentes en el SNC. Los linfocitos pueden cruzar la barrera hematoencefálica, migrar por el espacio perivascular del parénquima ejerciendo una función de viligancia y, finalmente, salir de nuevo a la circulación si no encuentran ningún estímulo patógeno. Cuando hay inflamación producida por activación de linfocitos, microglía o astrocitos, la función de la barrera hematoencefálica es afectada y otros tipos de células inmunes pueden ingresar al SNC.

LECTURAS RECOMENDADAS

1. Nolte J. The human brain: an introduction to its functional anatomy. 6.ª ed. St. Louis: Mosby/Elsevier; 2009.
2. Bear M, Connors B, Paradiso M. Neuroscience. Exploring the brain. 4.ª ed. Philadelphia: Wolters Kluwer; 2016.

3. Paxinos G, Mai J. The human nervous system. 2.ª ed. San Diego: Elsevier; 2004.

CAPÍTULO 4

CEREBRO

Como se señaló en el capítulo anterior, el sistema nervioso central o neuroeje está constituido por el encéfalo y el cordón espinal. El encéfalo está formado por el cerebro, el tronco cerebral y el cerebelo. A su vez, el cerebro está formado por los hemisferios y las estructuras interhemisféricas o diencefálicas. Este capítulo se centrará en el cerebro y los siguientes se dedicarán al estudio del tronco cerebral, el cerebelo y el cordón espinal.

Una de las características distintivas del encéfalo humano —a la que comúnmente se atribuyen las capacidades mentales de esta especie— es su dimensión. El encéfalo pesa cerca de 400 g al nacer. Este peso se triplica en los primeros tres años de vida, más como resultado de la formación de mielina y el crecimiento de los procesos neuronales que por el aumento de la población neuronal. La tasa de crecimiento se lentifica de ahí en adelante hasta alcanzar un peso final de 1 400 g en promedio hacia los 11 años de edad. Este peso se mantiene estable hasta la edad de 50 años, a partir de la cual se produce un decaimiento lento.

El tamaño del encéfalo es un reflejo del tamaño corporal; por ejemplo, el encéfalo de un elefante puede pesar 5 000 g. En ese sentido, la diferencia en el tamaño corporal de mujeres y hombres explica el hecho de que el peso del encéfalo masculino sea discretamente mayor que el del femenino. En general, los humanos tienen encéfalos más grandes que la mayoría de los animales, pero en relación con su peso corporal, el encéfalo de los delfines, algunos primates pequeños y los roedores es más grande que el de los humanos. La diferencia clave parece estar en la gran complejidad de interconexiones neuronales y en el crecimiento selectivo de ciertas áreas de la corteza cerebral, que, según se cree, están involucradas en funciones superiores.

CONFIGURACIÓN SUPERFICIAL

Los dos hemisferios cerebrales están separados por el surco interhemisférico, también llamado fisura o cisura cerebral longitudinal. Con una vista superior del cerebro, en el fondo de este surco se observa el cuerpo calloso. La superficie de los hemisferios tiene una gran cantidad de surcos distribuidos en diferentes direcciones, que cuando son profundos se denominan fisuras. La porción cerebral que se encuentra entre los surcos se denomina giro, lobulillo o circunvolución. La superficie exterior de un hemisferio corresponde

a la corteza cerebral. La presencia de surcos y giros es un mecanismo para aumentar el área cortical total. Aunque la apariencia de estos varía considerablemente de un cerebro a otro, hay características que se mantienen constantes. Cada hemisferio presenta tres caras denominadas: medial (paralela al otro hemisferio), lateral (contigua a la bóveda craneana) e inferior (cercana al piso de la cavidad craneana).

Cara inferior

Al observar la cara inferior o basal del cerebro, se pueden distinguir los dos hemisferios cerebrales, el surco interhemisférico que los separa y las estructuras interhemisféricas (figura 4.1). Para una adecuada orientación, se deben localizar los siguientes puntos de referencia: polo frontal (anterior), polo occipital (posterior) y polo temporal o lateral (pt). El surco lateral o cisura de Silvio divide la cara basal en dos lóbulos: el lóbulo orbitario, que se sitúa delante del surco y corresponde a la superficie orbitaria o inferior del lóbulo frontal, y el lóbulo temporooccipital, que se sitúa detrás del surco y corresponde a la superficie inferior de los lóbulos occipital y temporal.

Lóbulo orbitario u orbitofrontal

Los giros que forman el lóbulo orbitario tienen una apariencia variable y, de forma colectiva, se conocen como giros orbitarios o región orbitofrontal (rof). El único giro constante en esta superficie es el giro recto, que se localiza en dirección medial respecto al lóbulo orbitario y se extiende hacia la cara medial del hemisferio cerebral. Lateral al giro recto, se encuentra el surco recto u olfatorio, que se relaciona con el bulbo olfatorio por delante y con el tracto (cintilla) olfatorio por detrás (figuras 4.1 y 4.2). El bulbo olfatorio —un giro cerebral modificado de la paleocorteza— recibe información de la mucosa olfatoria localizada en el tercio superior de las fosas nasales. De la mucosa olfatoria se originan miles de fibras nerviosas que conforman el par craneano i o nervio olfatorio. Del bulbo olfatorio se originan fibras que forman el tracto o cintilla olfatoria y las estrías olfatorias medial y lateral. Las fibras que constituyen la estría olfatoria lateral llevan información al lóbulo temporal y las que forman la estría olfatoria medial se proyectan hacia la cara medial del hemisferio cerebral (estructuras límbicas mediales) y hacia las estructuras olfatorias contralaterales a través de la comisura blanca anterior. Entre las estrías olfatorias se localiza la sustancia perforada anterior, que es la región por donde pequeños vasos arteriales penetran al hemisferio cerebral.

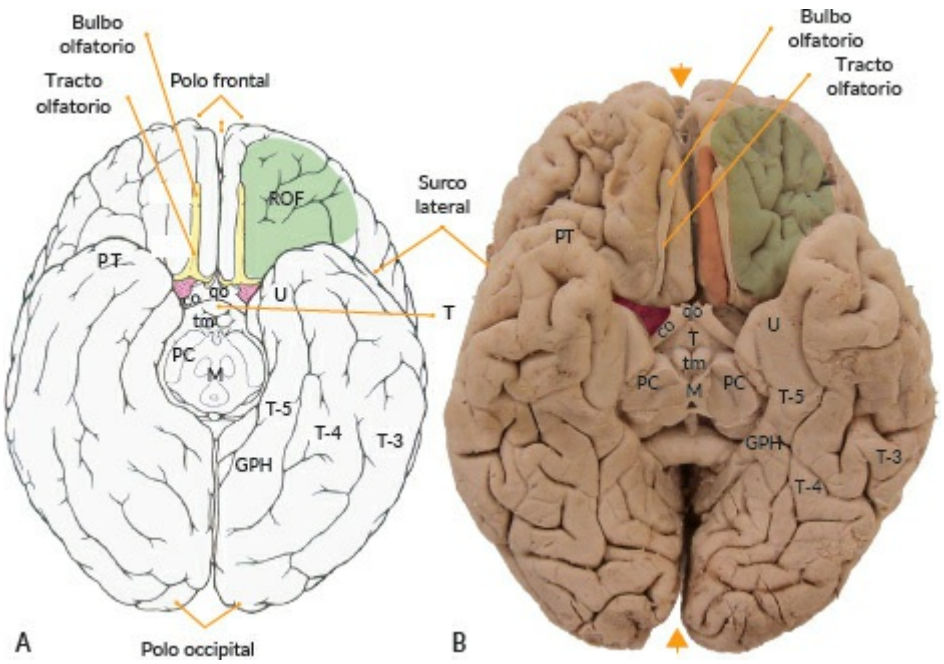


Figura 4.1A. Esquema de la cara inferior del cerebro. En los hemisferios cerebrales se puede identificar: el surco interhemisférico (►), el surco lateral, el lóbulo temporooccipital (T–3, T–4 y T–5) y el lóbulo orbitario o región orbitofrontal (en verde) con sus diferentes giros. El giro T–5 está formado por el uncus (U) adelante y el giro parahipocampal (GPH) atrás. También se pueden observar las estructuras interhemisféricas: el quiasma óptico (qo), los tractos o cintillas ópticas (co), el túber (T), los tubérculos mamilares (tm), y detrás de estos, el espacio perforado posterior y el mesencéfalo (M). La parte anterior del mesencéfalo corresponde a los pedúnculos cerebrales (PC).

Figura 4.1B. Pieza anatómica de la cara inferior del cerebro. Además de las estructuras señaladas en la figura 4.1A, se identifican el bulbo y la cintilla olfatorias, el espacio perforado anterior (en púrpura) y el giro recto (en naranja), delimitado hacia fuera por el surco recto.

En ocasiones, es posible observar en el lóbulo orbitario el surco en H, X o K, así llamado por su variabilidad y similitud con estas letras. Este surco se localiza por fuera del tracto olfatorio y da lugar a los giros orbitarios que lo circundan: lateral, medial, anterior y posterior.

Lóbulo temporooccipital

Detrás del surco lateral se encuentra el lóbulo temporooccipital, que es atravesado por dos surcos: el temporooccipital medial (colateral) y el temporooccipital lateral. Estos se extienden de adelante hacia atrás y dividen el lóbulo en tres giros: el giro temporooccipital lateral (T3), que se continúa en la cara lateral del lóbulo temporal, por fuera del surco temporooccipital lateral; el giro temporooccipital medio (T4), limitado por los surcos temporooccipitales lateral y medial; y el giro temporooccipital medial (T5), situado dentro del surco temporooccipital medial (colateral). El giro T5 está constituido por dos porciones: el uncus o gancho, en su parte anterior, y el giro parahipocampal, detrás del uncus (figura 4.1). En una vista de la cara inferior, bajo la corteza del giro parahipocampal y el uncus se encuentra el hipocampo y el complejo amigdalino, respectivamente (figura 4.2C).

Dentro del giro parahipocampal se encuentra el surco del hipocampo, que

se prolonga hasta el uncus. Este surco forma parte de la porción lateral del surco cerebral horizontal (fisura cerebral transversa), localizado entre el mesencéfalo y el lóbulo temporooccipital (figura 4.2A).

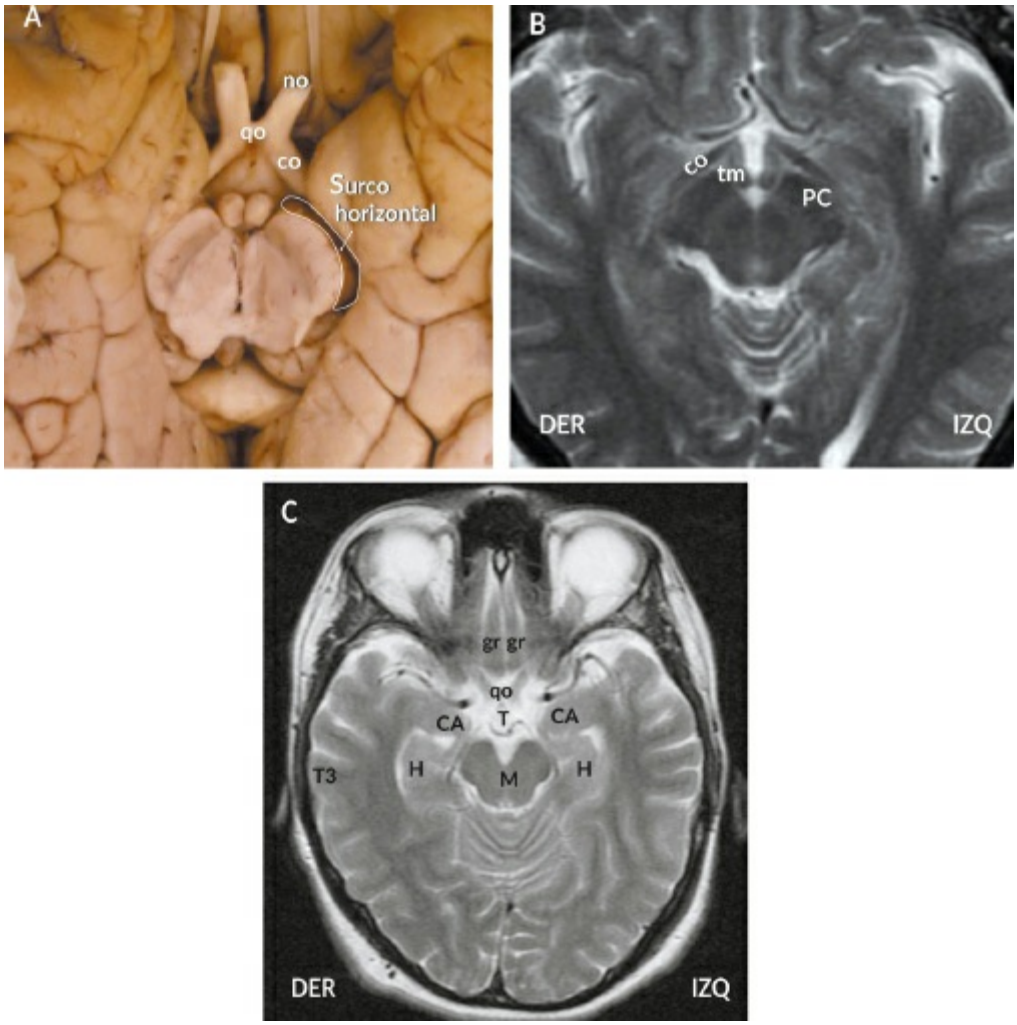


Figura 4.2A. Pieza anatómica de la cara inferior del cerebro. no: nervios ópticos; qo: quiasma óptico; co: cintillas ópticas. Entre el mesencéfalo y el giro T5 se observa el surco horizontal o fisura cerebral transversa, que se prolonga hacia la parte profunda de T5 como surco del hipocampo.
Figura 4.2B. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal a nivel del lóbulo temporal. co: cintillas ópticas; tm: tubérculos mamilares; PC: pedúnculos cerebrales.
Figura 4.2C. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal a nivel del lóbulo temporal. gr: giros rectos; CA: complejo amigdalino; H: hipocampo. Los dos últimos corresponden a la porción profunda del uncus y el giro parahipocampal, respectivamente.

El giro T5 se une con el giro del cíngulo de la cara medial del hemisferio y ambos forman el lóbulo límbico. La parte posterior del giro parahipocampal continúa en el lobulillo lingual de la cara medial. El giro lingual se halla entre el surco temporooccipital medial (colateral) y el surco calcarino, que se identificará en la cara medial del hemisferio.

Estructuras interhemisféricas

En la línea media de la cara basal del cerebro se encuentran las estructuras interhemisféricas (figuras 4.1 y 4.2), que desde el punto de vista embriológico se denominan diencéfalo. Anterior a estas estructuras se encuentra el surco interhemisférico. Al separar los hemisferios, se observa el extremo anterior (pico o rostrum) del cuerpo calloso. En posición más posterior se halla el quiasma óptico, que recibe los dos nervios ópticos y continúa hacia atrás formando los tractos o cintillas ópticas. Estas rodean los pedúnculos cerebrales en su extremo superior y terminan en los cuerpos geniculados laterales del metatálamo. Cada nervio óptico transmite información de su respectivo globo ocular, mientras que las cintillas ópticas llevan información de ambos globos oculares. La región limitada adelante por el quiasma y los tractos ópticos y atrás por los pedúnculos cerebrales se denomina rombo optopeduncular (figura 4.3A). Dentro del rombo se localizan las siguientes estructucturas:

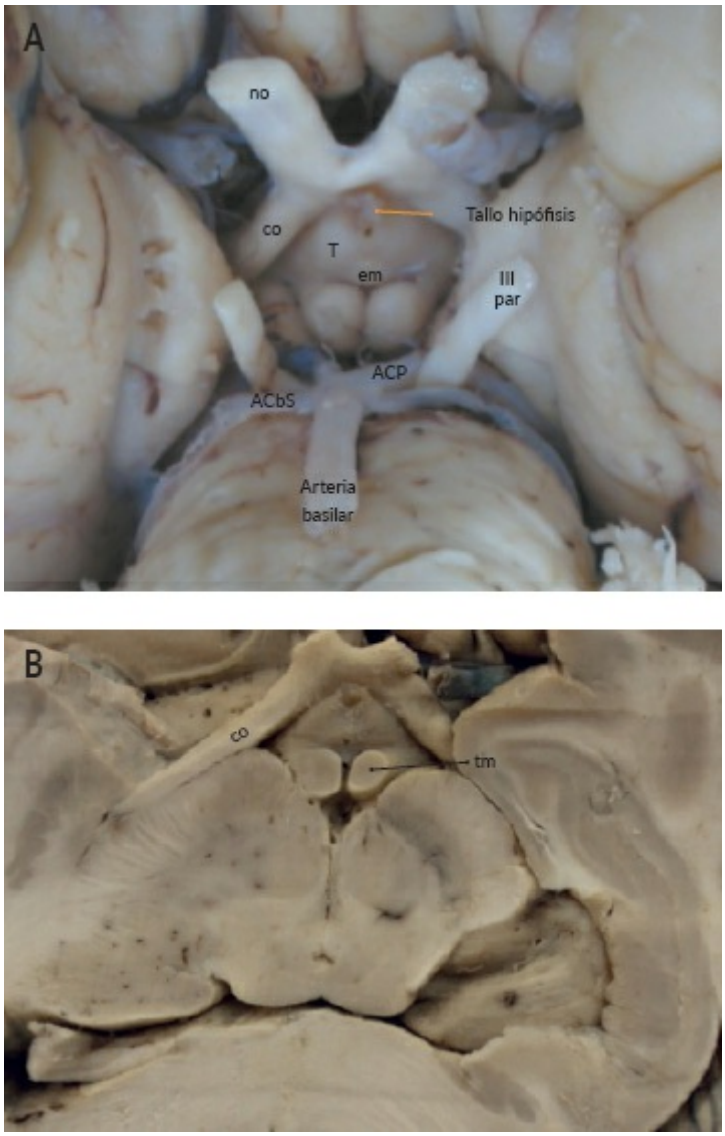


Figura 4.3A. Pieza anatómica con acercamiento del rombo optopeduncular. no: nervio óptico; co: cintilla óptica; T: túber; em: eminencia media; ACP: arteria cerebral posterior; ACbS: arteria cerebelosa superior.

Figura 4.3B. Pieza anatómica con acercamiento del rombo optopeduncular. Se advierten los tubérculos mamilares (tm), rodeados por la cápsula de sustancia blanca, y las cintillas ópticas (co).

Túber: se encuentra justo detrás del quiasma óptico y forma parte del hipotálamo. Se dirige hacia la silla turca en forma de embudo y se prolonga hacia abajo en el tallo de la hipófisis, que se rompe con facilidad al extraer el encéfalo. La cara interna del túber se conoce como infundíbulo; es decir, visto desde afuera se llama túber y visto por dentro, infundíbulo. La porción lateral del túber presenta dos eminencias (izquierda y derecha), conocidas como eminencias laterales, que contienen núcleos hipotalámicos. Entre las dos se localiza la eminencia media, que contiene el núcleo arcuato y constituye una conexión importante entre el hipotálamo y la glándula hipófisis.

Tubérculos (cuerpos) mamilares: son dos protuberancias redondas localizadas detrás del túber. Cada tubérculo mamilar contiene dos núcleos, uno grande lateral y uno pequeño medial, rodeados por una cápsula de fibras mielinizadas (figura 4.3B).

Sustancia (espacio) perforada posterior: es una región por donde penetran pequeños vasos arteriales. También hace parte del hipotálamo y está situada detrás de los cuerpos mamilares y delante de los pedúnculos cerebrales, donde se halla el origen aparente del par craneano iii o nervio oculomotor.

Cara lateral

Para describir esta cara se debe tener primero el polo frontal, el polo occipital y el polo temporal como puntos de referencia. En la cara lateral de cada hemisferio hay un surco lateral (cisura de Silvio) y un surco central (cisura de Rolando). El surco lateral comienza en la cara basal del hemisferio, se dirige en dirección postero–superior por la cara lateral, separando los lóbulos frontal y parietal del lóbulo temporal, y termina atrás, rodeado por el giro supramarginal (figura 4.4). El surco central recorre la cara lateral hacia abajo y un poco hacia adelante, separando los lóbulos frontal (adelante) y parietal (atrás). Este surco está cerrado abajo por un «pliegue de paso» denominado opérculo central o rolándico.

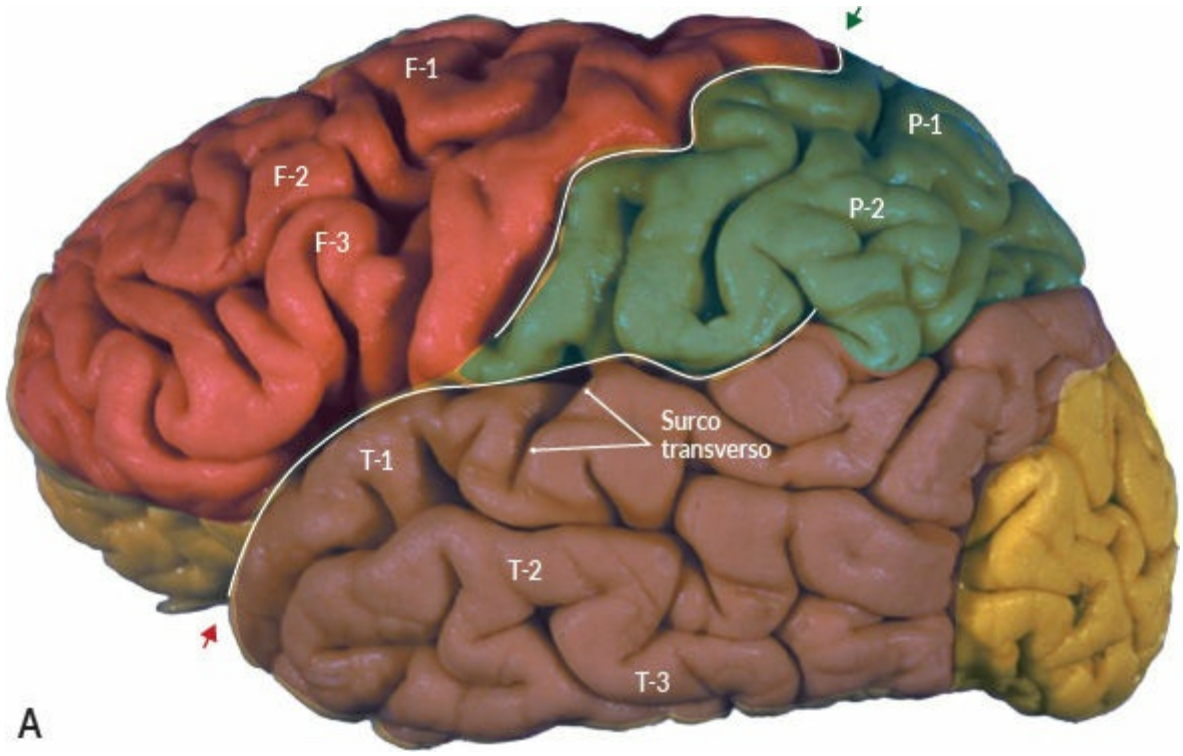


Figura 4.4A. Pieza anatómica con cara lateral de un hemisferio cerebral. ►: surco lateral (Silvio); ►: surco central (Rolando); en rojo: lóbulo frontal; en verde: parietal; en amarillo: occipital; en café: temporal.

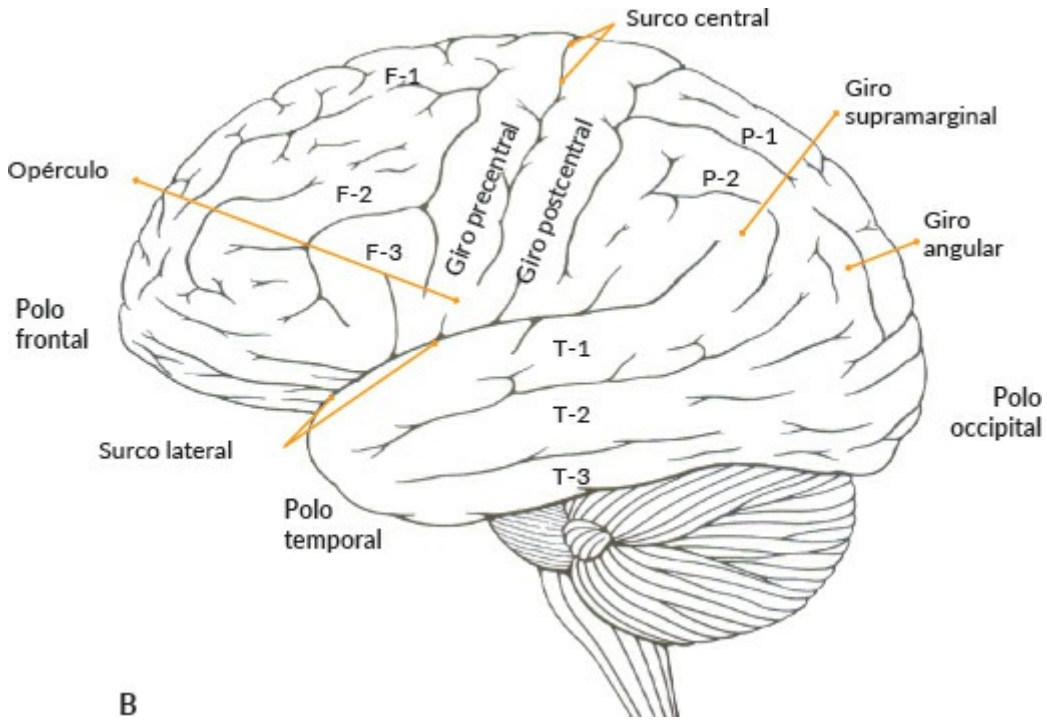


Figura 4.4B. Esquema de la cara lateral de un hemisferio cerebral. **Fuente:** adaptada de (1).

Lóbulo frontal

Es el más voluminoso de los lóbulos cerebrales. Se extiende desde el surco

central hasta el polo frontal y ocupa parte de la cara medial del hemisferio cerebral. En la porción posterior de este lóbulo, anterior al surco central, se localiza el giro precentral, que cursa paralelo a este surco y está limitado adelante por el surco precentral. La mayor parte del giro precentral es corteza motora primaria, es decir, contiene neuronas que originan las vías descendentes motoras y garantizan el inicio del movimiento voluntario. Dentro del giro precentral, las neuronas están organizadas de manera somatotópica, es decir, diferentes partes del giro están asociadas con regiones específicas del cuerpo. Por ejemplo, la región inferior del giro precentral (el opérculo), que está cercana al surco lateral, se asocia con los movimientos de la laringe y la lengua. Las neuronas que se localizan más arriba del opérculo se relacionan con los movimientos de la cara (hemicara) y de la extremidad superior del lado opuesto. Al dibujar las partes del cuerpo sobre la región del giro precentral encargada de su coordinación (organización somatotópica), se obtiene una figura desproporcionada conocida como homúnculo (figura 4.5). El homúnculo motor ilustra la forma en que algunos grupos de neuronas forman poblaciones neuronales de diferente tamaño que se asocian con regiones específicas del cuerpo.

Delante del giro precentral hay tres giros perpendiculares a este y paralelos entre sí: el frontal superior (F–1), el frontal medio (F–2) y el frontal inferior (F–3). El giro frontal superior continúa en la cara medial del hemisferio. El giro frontal inferior se divide en tres partes: la porción orbitaria, que es la más anterior y se prolonga en el lóbulo orbitofrontal; la porción opercular, que es la más posterior; y la región triangular, entre las dos anteriores.

El lóbulo frontal se divide en cuatro áreas funcionales generales:

- La corteza motora primaria, mencionada anteriormente, que abarca la mayor parte del giro precentral.
- Las áreas premotora y motora suplementaria, que ocupan el resto del giro precentral y las porciones adyacentes de los giros frontales superior y medio, las cuales también están relacionadas con el inicio de movimientos voluntarios.
- El área de Broca, que corresponde a las regiones opercular y triangular del giro frontal inferior de un hemisferio (usualmente el izquierdo) y está relacionada con la producción del lenguaje hablado y escrito.
- La corteza prefrontal, que cubre el resto del lóbulo frontal y está relacionada con aspectos de personalidad, perspicacia y planeación.

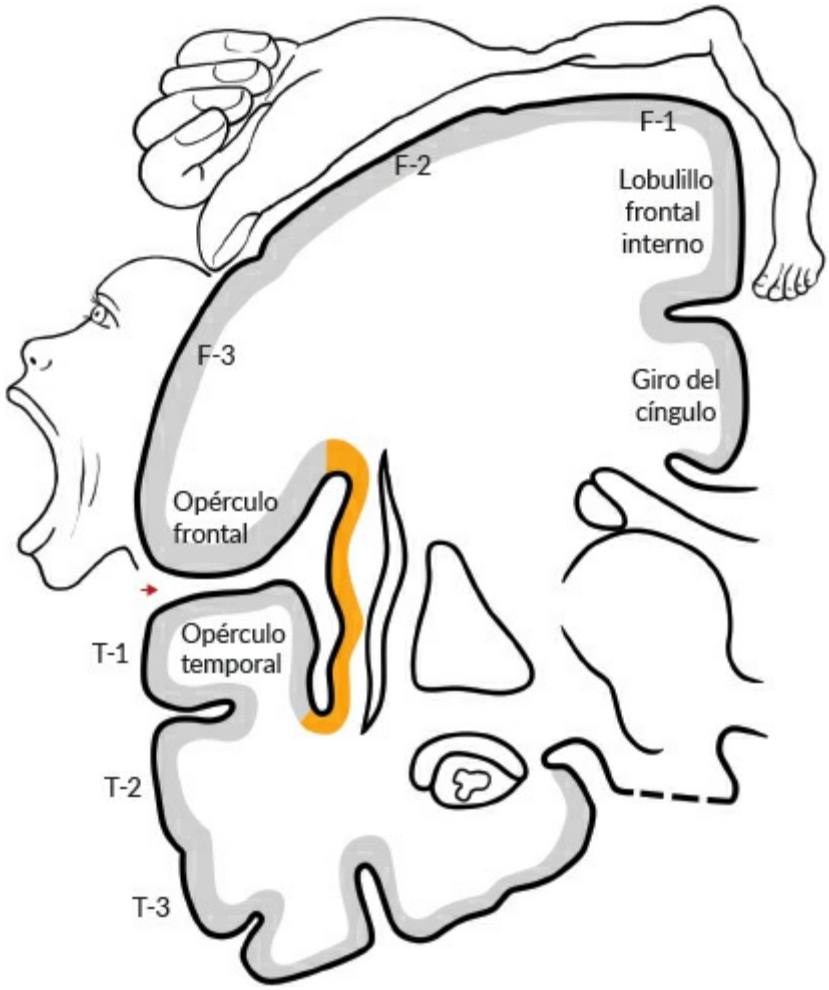


Figura 4.5. Esquema de corte coronal de un hemisferio cerebral a nivel del giro precentral con representación de homúnculo motor a lo largo de la cara lateral y medial. ►: surco lateral; en amarillo: lóbulo de la ínsula.

Lóbulo parietal

El lóbulo parietal está relacionado con funciones de percepción y procesos somatosensoriales. Se sitúa detrás del surco central y es atravesado por el surco postcentral (paralelo al surco central) y el surco horizontal o interparietal (perpendicular al surco postcentral). El giro postcentral se localiza entre el surco central y el postcentral, y los giros parietales horizontales superior (P1) e inferior (P2) son paralelos al surco parietal horizontal (figura 4.4). En el giro postcentral se integra la información somestésica (de movimiento y tacto). Allí, la corteza cerebral de un lado recibe información del hemicuerpo del lado opuesto. Al igual que la corteza motora, el giro postcentral está organizado somatotópicamente, de manera que se puede obtener un esquema de homúnculo paralelo a la corteza motora.

Algunos autores consideran que el giro parietal inferior (P2) incluye dos giros: el supramarginal y el angular. El giro supramarginal se localiza en la porción posterior del surco lateral y el giro angular, en la extremidad

posterior del surco temporal superior. Estos dos reciben información audiovisual y están relacionados con discriminaciones perceptuales e integraciones complejas.

Lóbulo temporal

En el lóbulo temporal se observan los surcos horizontales temporal superior y temporal inferior, que delimitan los giros temporales: superior (T1) —entre el surco lateral y el surco temporal superior—, medio (T2) —entre los surcos temporales— e inferior (T3) —debajo del surco temporal inferior— (figura 4.4).

En ocasiones, se puede identificar el surco transverso a nivel del giro T1 (figura 4.4). La región adyacente a este surco se conoce como giro de Heschl y constituye la región primaria auditiva. En la región posterior del giro temporal superior se localiza el área de Wernicke, que corresponde a la porción del cerebro —usualmente del hemisferio izquierdo— relacionada con la comprensión del lenguaje.

Lóbulo de la ínsula

En la parte profunda del surco lateral, se encuentra el lóbulo de la ínsula. Este lóbulo refleja una convergencia de las cortezas de los lóbulos frontal, parietal y temporal, y se ha asociado con la integración de información gustativa, información visceral, dolor y funciones vestibulares. La porción del lóbulo que recubre la ínsula se denomina opérculo (del latín operculum), de manera que hay tres opérculos: frontal, parietal y temporal. La ínsula está formada por giros cortos en la parte anterior y giros largos en la región posterior (figura 4.6). Hallazgos recientes sugieren que la corteza insular anterior (cia), que contiene neuronas de von Economo, juega un papel importante en los mecanismos de atención y, por consiguiente, se debe considerar como potencial neurobiológico de la conciencia.

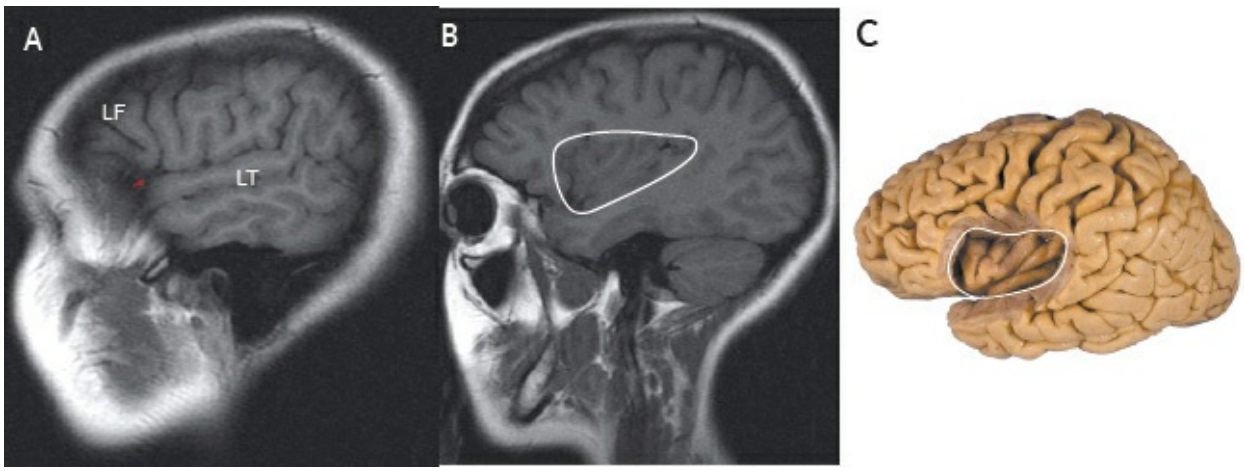


Figura 4.6A. IRM en T1 (T1–W1) de la cara lateral de un hemisferio cerebral. ►: surco lateral; LT: lóbulo temporal; LF: lóbulo frontal.
Figura 4.6B. IRM en T1 (T1–W1) de corte parasagital más medial que el anterior. Línea blanca: lóbulo de la ínsula.
Figura 4.6C. Pieza anatómica en la que se ha seccionado F1, T1 y parte inferior de los giros pre y postcentrales. Línea blanca: lóbulo de la ínsula. **Fuente:** adaptada de (1).

Cara medial

Las estructuras de la cara medial del cerebro se pueden examinar al realizar un corte sagital a través del surco interhemisférico. Como hemos señalado en las proyecciones anteriores, primero se deben identificar los polos frontal y occipital para tener una orientación espacial de esta cara.

Luego, se debe localizar el cuerpo calloso, una estructura formada por miles de fibras nerviosas que permite la comunicación entre regiones equivalentes de ambos hemisferios cerebrales. El cuerpo calloso presenta cuatro porciones que, en dirección antero–posterior, son: el pico o rostrum, la rodilla, el cuerpo y el esplenio (rodete). En una vista superior, se observa el surco del cuerpo calloso (surco pericalloso), que rodea al cuerpo calloso y, al llegar al esplenio, continúa en el surco del hipocampo, en la cara inferior del hemisferio. El giro del cíngulo — que circunda al cuerpo calloso y puede prolongarse hasta el esplenio— se une mediante un pliegue de paso situado detrás del esplenio (el istmo del cíngulo) con el giro parahipocampal de la cara inferior del hemisferio para constituir así el lóbulo límbico (figura 4.9).

El surco del cíngulo (surco callosomarginal) rodea al lobulillo del cíngulo hasta la altura del esplenio, donde se dirige hacia arriba y recibe el nombre de surco marginal (figura 4.7).

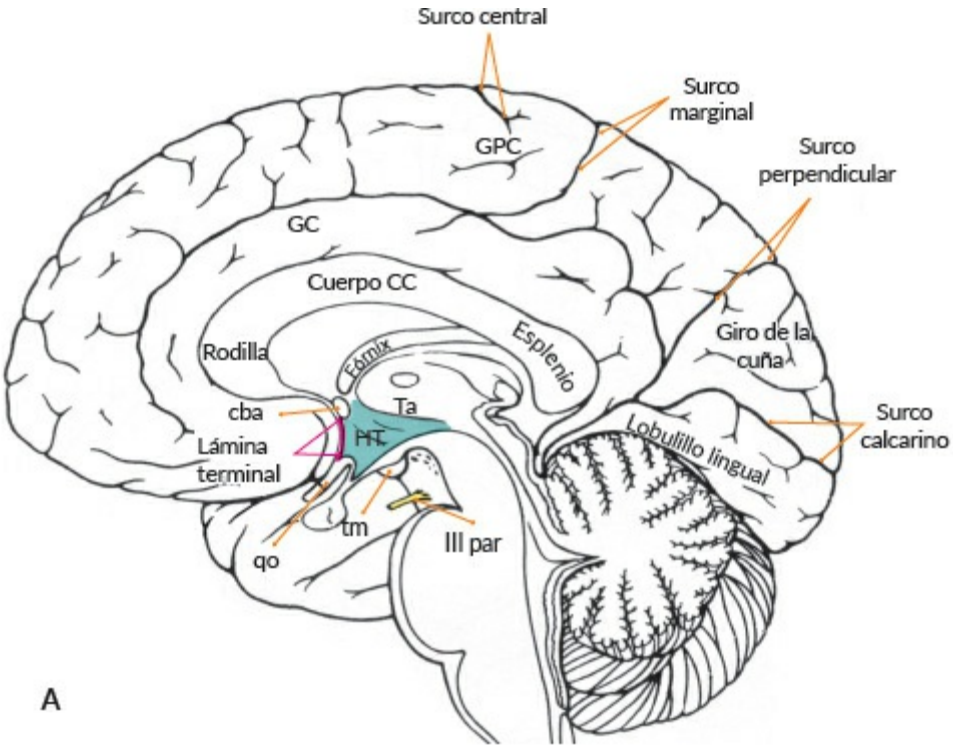


Figura 4.7A. Esquema de la cara medial del hemisferio cerebral. GC: giro del cíngulo; GPC: giro paracentral; CC: cuerpo calloso; Ta: tálamo; HT: hipotálamo; cba: comisura blanca anterior; qo: quiasma óptico; tm: tubérculo mamilar. La lámina terminal constituye la pared anterior del tercer ventrículo, se fija arriba en la comisura blanca anterior y el pico del cuerpo calloso, y abajo, en la parte anterior del quiasma óptico.

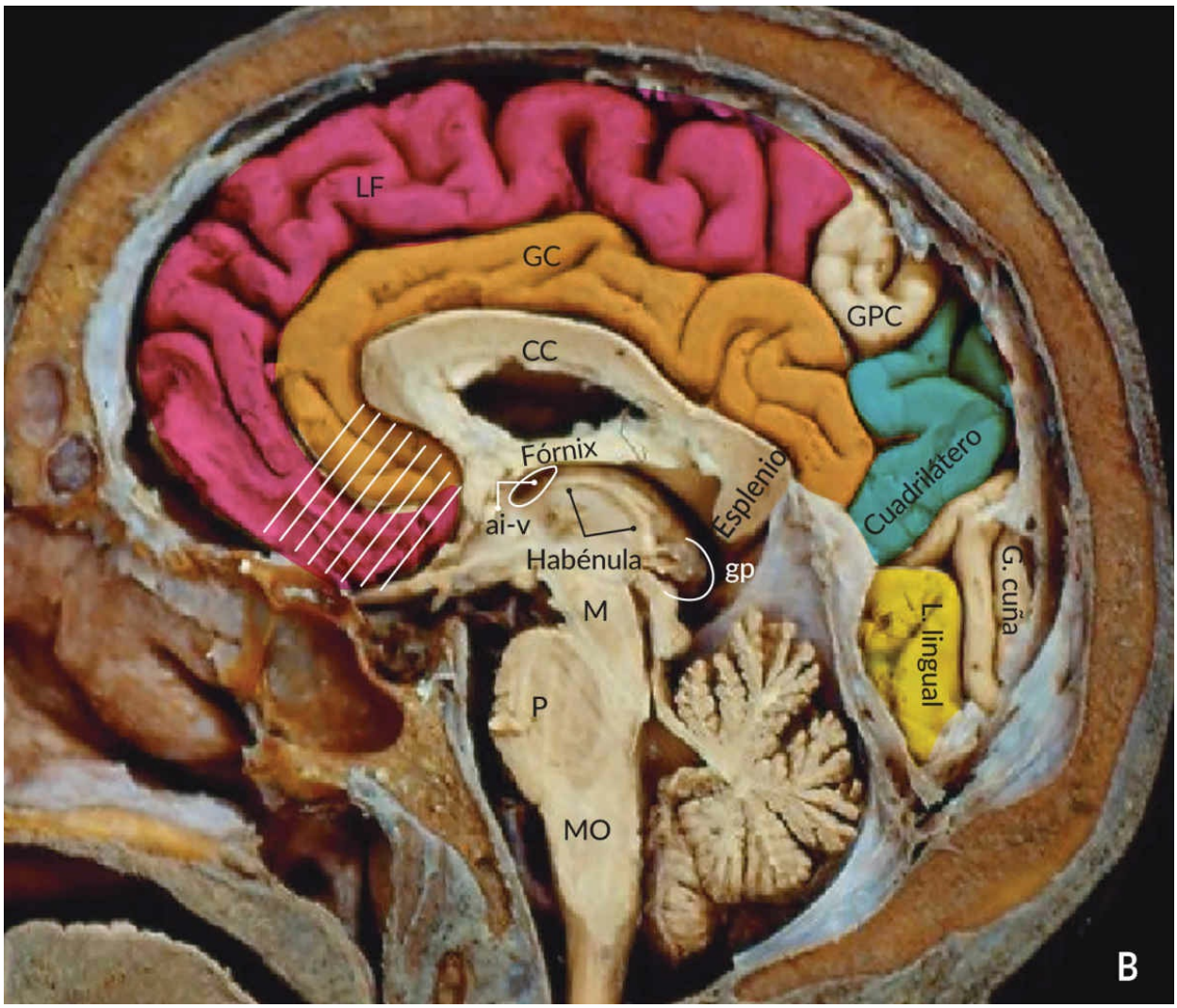


Figura 4.7B. Corte sagital anatómico en el que se identifican las estructuras de la figura anterior. gp: glándula pineal; ai–v: agujero interventricular; LF: lobulillo frontal; GC: giro del cíngulo; CC: cuerpo calloso; GPC: giro paracentral; líneas blancas: región subcallosa; M: mesencéfalo; P: puente: MO: médula oblongada.

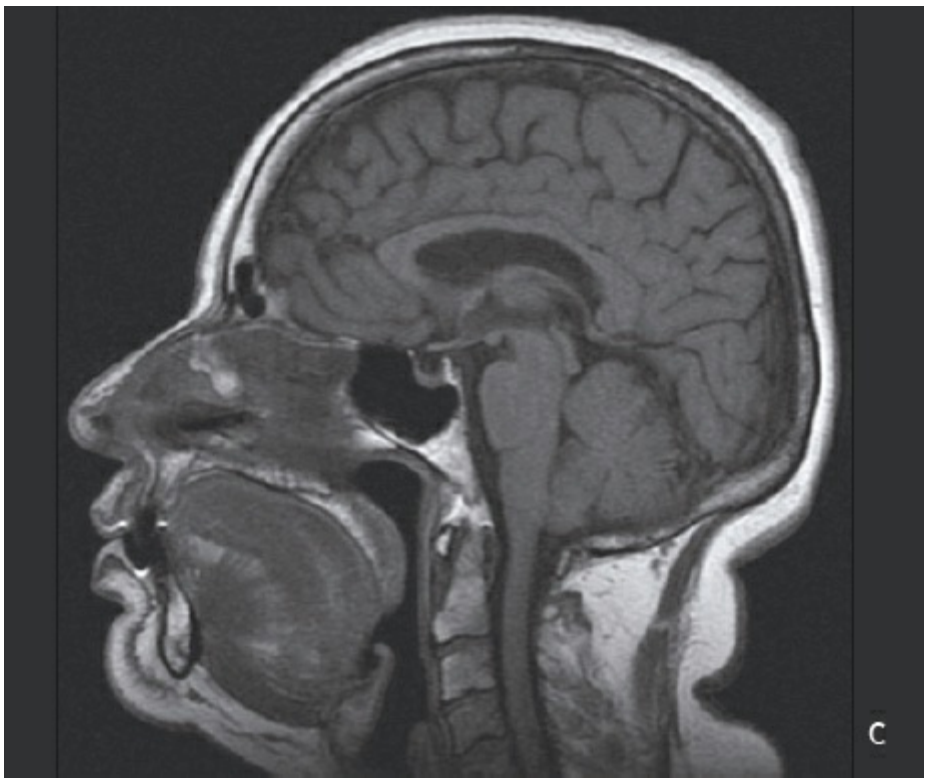


Figura 4.7C. IRM en T1 (T1–WI) de corte sagital. Se pueden identificar las estructuras señaladas en la figura 4.7A y B. Dado que el calcio no se detecta en una IRM, no se observa la glándula pineal.

El lobulillo cuneiforme (cuneus o cuña) tiene forma triangular. Su porción anteroposterior limita con el surco parietooccipital y su parte posteroinferior, con el surco calcarino. El surco calcarino comienza cerca del polo occipital, se dirige hacia adelante y luego describe una curva hacia arriba. Debajo del surco calcarino se encuentra el lobulillo lingual, que se proyecta a la cara basal del hemisferio y se prolonga al giro parahipocampal. La transición del giro lingual al parahipocampal ocurre a nivel del istmo del giro del cíngulo. El lóbulo occipital está relacionado principalmente con funciones visuales y la corteza visual primaria se localiza en las regiones inferior y superior del surco calcarino. El resto del lóbulo occipital corresponde a la corteza visual de asociación, que procesa información visual compleja.

La región cortical cerebral que se encuentra debajo de la rodilla del cuerpo calloso y termina en el giro paraterminal, delante de la lámina terminal, se conoce como región subcallosa (figura 4.8). Debajo del cuerpo calloso se sitúan las siguientes estructuras interhemisféricas:

Lámina terminal: se extiende desde el pico del cuerpo calloso hasta la cara anterior y superior del quiasma óptico.

Septo lúcido: del latín septum pellucidum. Se localiza debajo del cuerpo calloso y es más prominente en su parte anterior. Se compone de dos delgadas membranas de glía. En la mayoría de los encéfalos, las dos membranas están yuxtapuestas y dan la apariencia de ser una sola

estructura. Están separadas por una cavidad estrecha llamada cavum del septo lúcido y forman la pared medial de los ventrículos laterales. Si se retira, es posible observar el ventrículo lateral y la cabeza del núcleo caudado (figura 4.8).

Fórnix o trígono: está formado por fibras que provienen de la formación hipocampal y se encuentra profundo a T5. Se origina en el hipocampo, rodea el tálamo y, en su sección anterior, sus fibras se dividen en dos direcciones: unas terminan en la región septal y subcallosa (fibras precomisurales) y otras, en los cuerpos mamilares (fibras poscomisurales). Una función básica del fórnix es transmitir información desde la formación del hipocampo hasta la región septal y el hipotálamo. El fórnix presenta cuatro porciones (figura 4.9):

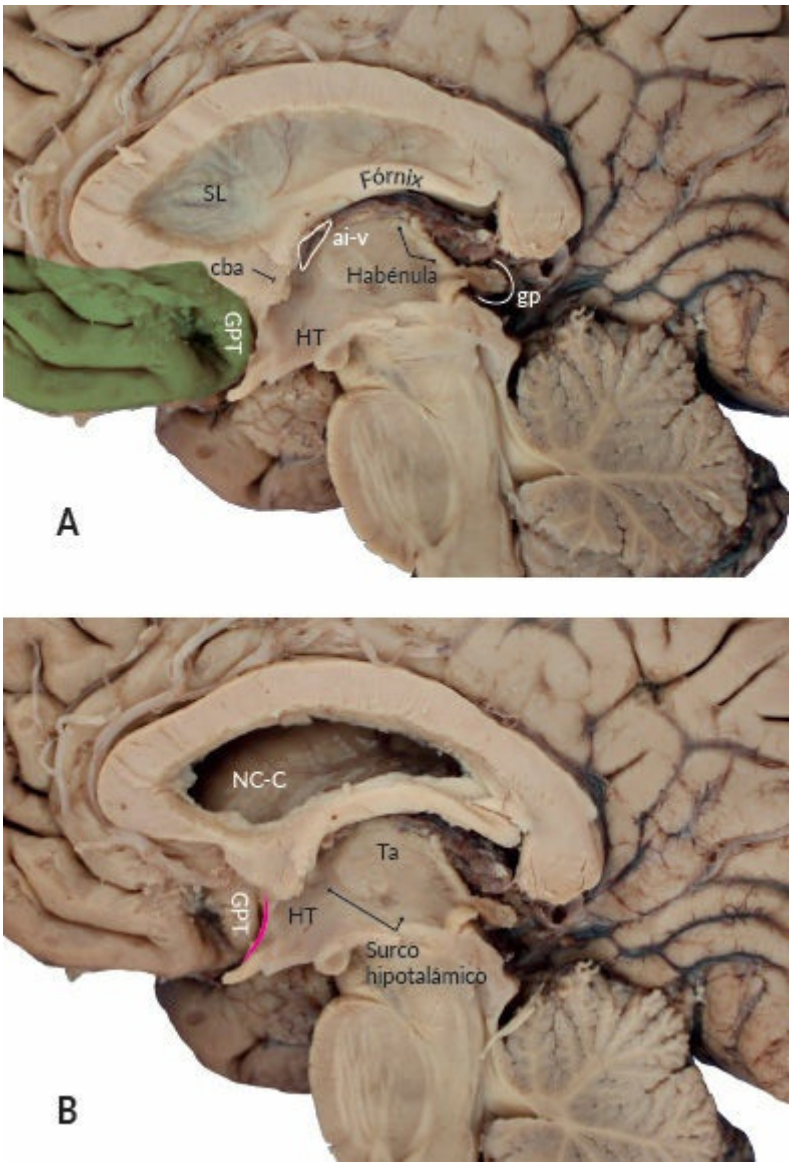


Figura 4.8A. Corte sagital anatómico de las estructuras interhemisféricas. SL: septo lúcido; ai–v: agujero interventricular o de Monro; gp: glándula pineal; cba: comisura blanca anterior; GPT: giro paraterminal; HT: hipotálamo; en verde: región subcallosa.

Figura 4.8B. Corte sagital anatómico de las estructuras interhemisféricas en el que se ha retirado el septo lúcido. Se observa el cuerno frontal del ventrículo lateral y la cabeza del núcleo caudado

(NC–C). GPT: giro paraterminal; Ta: tálamo; HT: hipotálamo; en fucsia: lámina terminal.

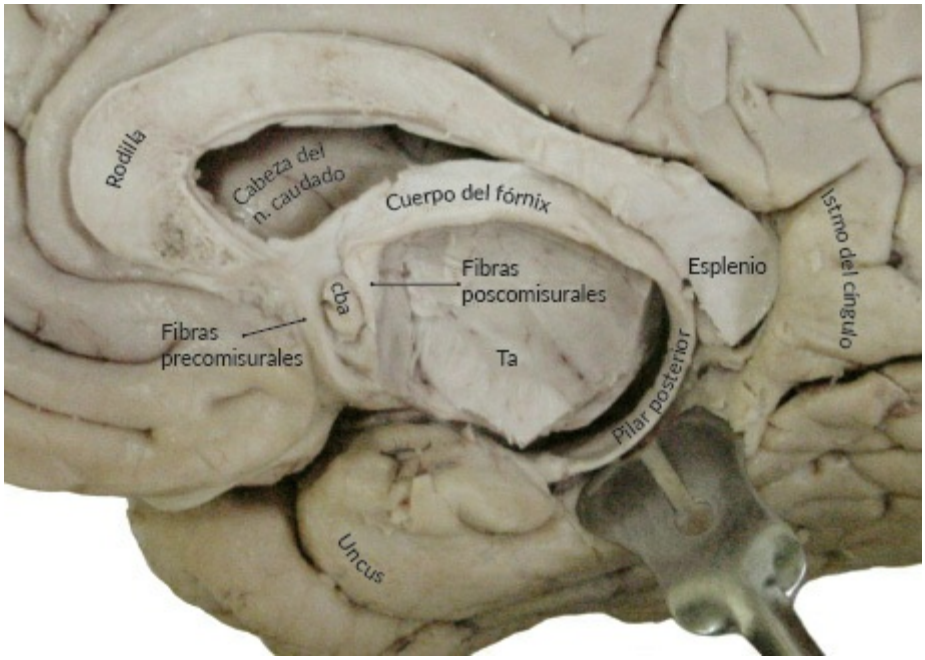


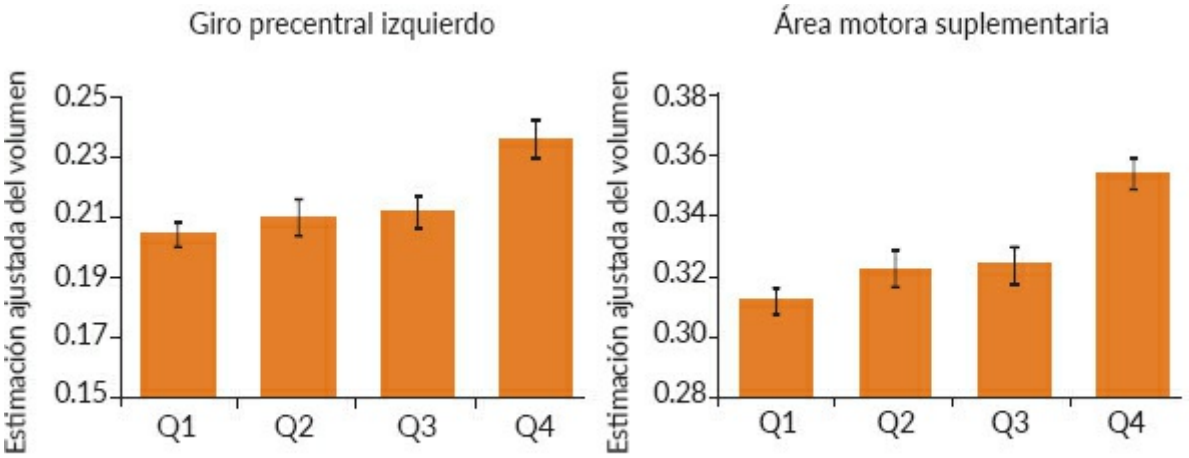
Figura 4.9. Corte sagital anatómico de las estructuras interhemisféricas en el que se ha retirado el tronco cerebral y parte del tálamo (Ta). La espátula señala la fimbria. cba: comisura blanca anterior.

- La fimbria, que corresponde a su origen.
- El pilar posterior, que asciende por detrás del tálamo hasta el esplenio.
- El cuerpo, que se dirige hacia adelante hasta la comisura blanca anterior.
- El pilar anterior, que desciende por delante del tálamo hasta la comisura blanca anterior, la cual divide sus fibras en precomisurales y poscomisurales.

Agujero interventricular o de Monro: se localiza justo detrás del pilar anterior del fórnix y delante del tálamo. Es el espacio que permite la comunicación entre los ventrículos laterales y el tercer ventrículo.
Comisura blanca anterior: divide el pilar anterior del fórnix en fibras pre y poscomisurales. Une los dos lóbulos temporales y las cintillas olfatorias.
Tálamo: situado debajo del fórnix, es una masa nuclear ovoidea formada por grupos nucleares responsables de la integración y relevo de información hacia diferentes regiones corticales del cerebro asociadas con procesos sensitivos, motores, autonómicos y emocionales. En su borde superior se halla la estría medular o habénula, en la que se inserta el techo del tercer ventrículo. La habénula contiene fibras aferentes que se relacionan con los núcleos habenulares localizados entre la región posterior del tálamo (pulvinares) y el mesencéfalo. Cerca de estos núcleos y debajo del esplenio del cuerpo calloso se encuentra la glándula pineal (figura 4.8A).

Hipotálamo: se localiza en la parte inferior delantera del tálamo y está separado de este por el surco hipotalámico. A pesar de su tamaño reducido, el hipotálamo está formado por núcleos que controlan funciones endocrinas, reguladoras del apetito, de la ingesta de líquidos, de la temperatura, del comportamiento sexual y emocional, entre otras. En el hipotálamo se encuentra el infundíbulo, que en el corte sagital presenta la forma de un triángulo cuyo vértice inferior se prolonga como tallo de la hipófisis. La pared exterior del hipotálamo constituye el túber, ya descrito en la cara basal. Delante del infundíbulo se halla el quiasma óptico, que puede aparecer unido a un nervio o tracto óptico. Detrás del infundíbulo se encuentran los cuerpos (tubérculos) mamilares, que forman parte del hipotálamo. El tálamo y el hipotálamo forman la pared lateral del ventrículo medio o tercer ventrículo.

Para ilustrar la importancia de conocer la nomenclatura neuroanatómica, se puede tomar como ejemplo una investigación en la que Erickson et al. (2) examinaron durante nueve años la relación entre el volumen de la corteza cerebral (sustancia gris) y la actividad física (figura 4.10). El estudio concluyó que a mayor cantidad de ejercicio, mayor volumen de sustancia gris. Según los autores, esto se asocia con una reducción en el riesgo de compromiso cognitivo. En conclusión, es necesario hacer ejercicio.



Continúa en la siguiente página.

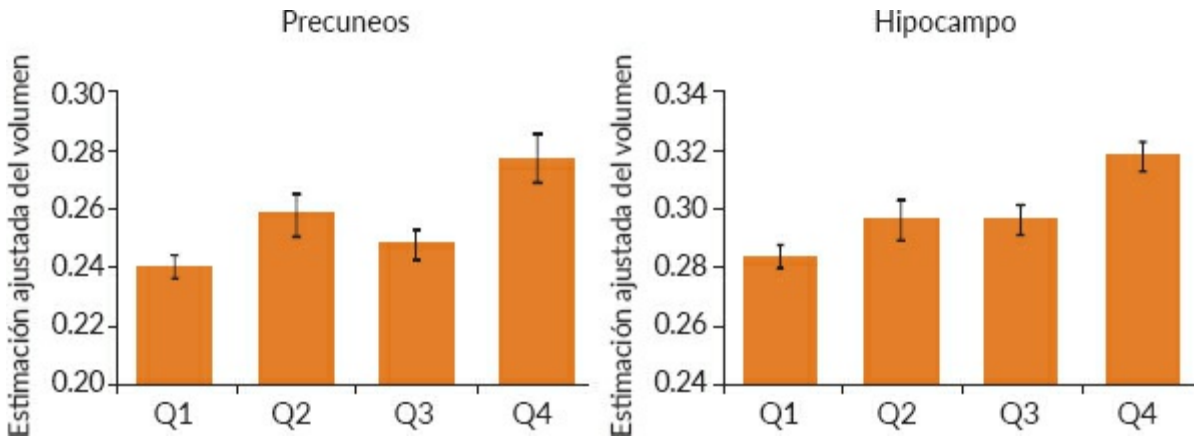


Figura 4.10. Volúmenes medios de cuatro regiones del cerebro: giro precentral, área motora suplementaria, precuneus e hipocampo. Los cuartiles (Q) corresponden a la intensidad de ejercicio, donde Q1 es el grupo que realiza menor cantidad de ejercicio y Q4, el que realiza mayor cantidad de ejercicio por semana. **Fuente:** adaptada de (2).

CONFIGURACIÓN INTERIOR

Para reconocer algunas estructuras que se encuentran en la zona interna del cerebro, a continuación se presentarán diferentes cortes horizontales desde la región más superior hasta la más inferior de los hemisferios. Después, se mostrarán cortes coronales desde la porción más anterior hasta la más posterior del cerebro.

Cortes horizontales

Al realizar un corte en la parte superior del cerebro, se identifica la corteza cerebral en la periferia y, a mayor profundidad, la sustancia blanca (núcleo oval), que está constituida por miles de fibras nerviosas (axones rodeados por mielina) (figura 4.11).

Las diferentes regiones del cerebro están conectadas mediante fibras nerviosas, y de estas conexiones surgen los pensamientos, las sensaciones y las percepciones. En general, estas fibras se clasifican de acuerdo a su dirección y función en tres grandes grupos:

Fibras de asociación: interconectan regiones corticales dentro de un mismo hemisferio y muchas de estas forman haces o fascículos. Un ejemplo es el fascículo arcuato, que se localiza en la sección lateral del hemisferio, alrededor de la ínsula. Este fascículo conecta áreas del lóbulo frontal con los lóbulos parietal, temporal y occipital. Cumple un papel importante en los mecanismos del lenguaje al conectar el área de Wernicke con el área de Broca. Otro ejemplo es el haz del cíngulo, que está cubierto por el lobulillo del cíngulo y el giro parahipocampal, y conecta regiones

corticales de los lóbulos frontal, parietal y temporal.

Fibras comisurales: atraviesan la línea media e interconectan áreas de los dos hemisferios. La mayoría de estas fibras conectan regiones similares (homotópicas) en ambos hemisferios, pero hay otras que conectan regiones diferentes (heterotópicas). La estructura constituida por fibras comisurales más voluminosa es el cuerpo calloso.

Fibras de proyección: conectan una región cortical cerebral con una estructura no cortical, por ejemplo, el tálamo (fibras talamocorticales) o el cordón espinal (fibras corticoespinales).

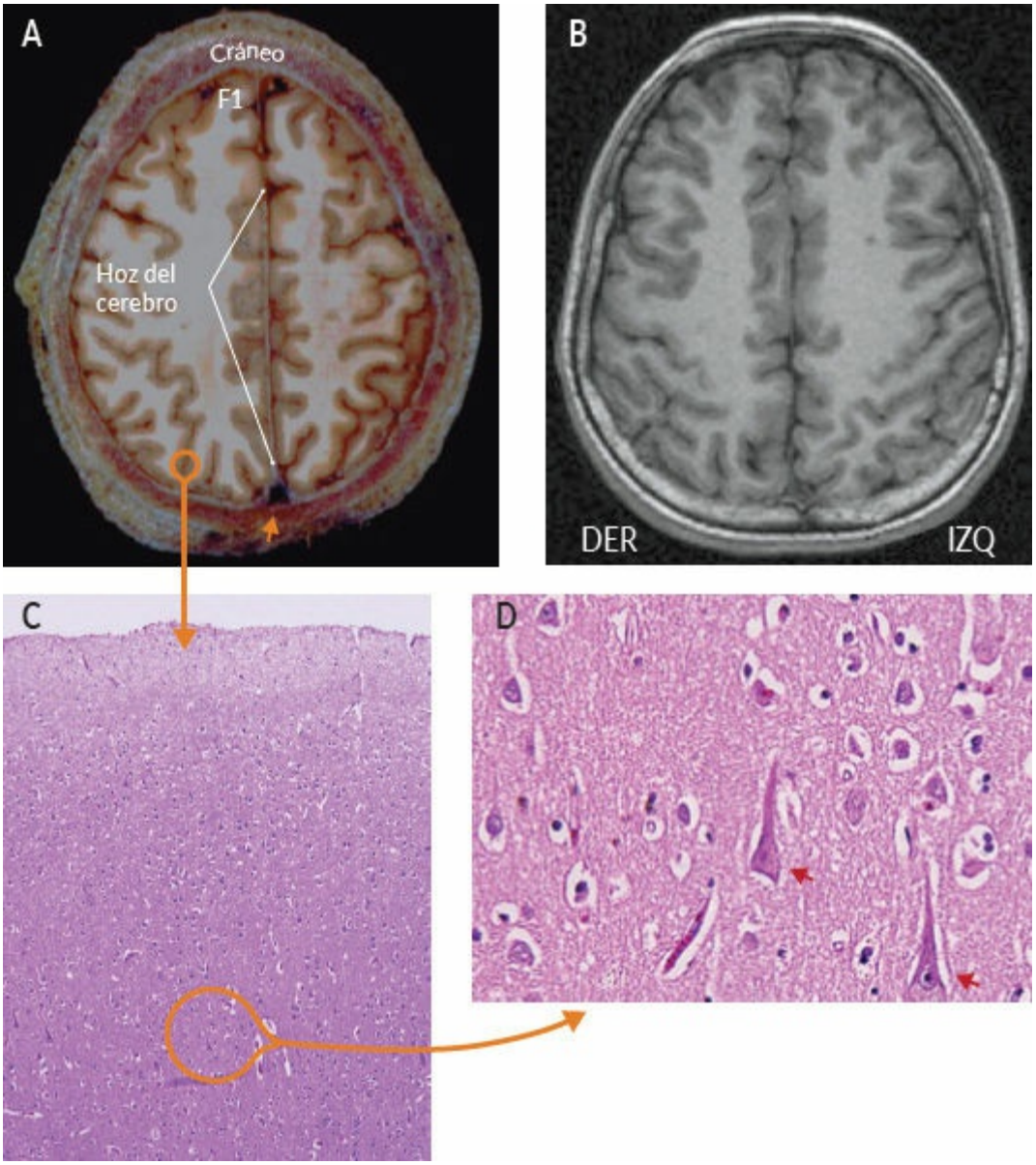


Figura 4.11A. Corte transversal superior anatómico del cerebro. Se aprecia el cuero cabelludo, el cráneo, la duramadre adherida a la cara interna del cráneo, la corteza cerebral y la sustancia blanca en el centro (núcleo oval). Se identifica el surco interhemisférico ocupado por una prolongación meníngea denominada hoz del cerebro. Anterior a esta se encuentra el giro frontal superior (F1) y posterior a esta, el seno sagital (longitudinal) superior (►).

Figura 4.11B. IRM en T1 (T1–WI) que muestra las mismas estructuras de la figura anterior. La prolongación meníngea no se aprecia.

Figura 4.11C. Microscopía de luz de la corteza de una circunvolución del lóbulo frontal con coloración HE 10x.
Figura 4.11D. Microscopía de luz de la corteza cerebral con coloración HE 20x. Se observan neuronas piramidales (►) de la capa V de la corteza cerebral. **Fuente:** cortesía del Dr. Pedro Franco, Departamento de Morfología, Universidad Nacional de Colombia.

Con la tecnología moderna, es posible visualizar en vivo la distribución de los diferentes tractos de fibras nerviosas, tanto en personas sanas como en aquellas con alteraciones neurológicas. A continuación, se presentan algunos trabajos recientes de tractografía o imagenes con tensores de difusión (DTI, por su sigla en inglés), una técnica que permite examinar el recorrido de las fibras que forman los fascículos o tractos (figuras 4.12 y 4.13).

Al hacer un corte horizontal más profundo, dentro de cada hemisferio se observará el cuerpo de los ventrículos laterales (figura 4.14). Un corte más inferior permite apreciar los núcleos o ganglios basales, localizados en la parte más interna de los hemisferios cerebrales (figura 4.15). Estos núcleos son: el núcleo caudado, el putamen, el globo pálido, el claustro o antemuro, el tálamo, la sustancia negra y el núcleo subtalámico. Desde un punto de vista filogenético, el núcleo caudado y el putamen, que poseen características histológicas similares, se conocen como el estriado o neoestriado. El globo pálido se conoce como paleoestriado y el complejo amigdalino como el arquiestriado. Desde un punto de vista neuroanatómico, el putamen y el globo pálido constituyen el núcleo lenticular.

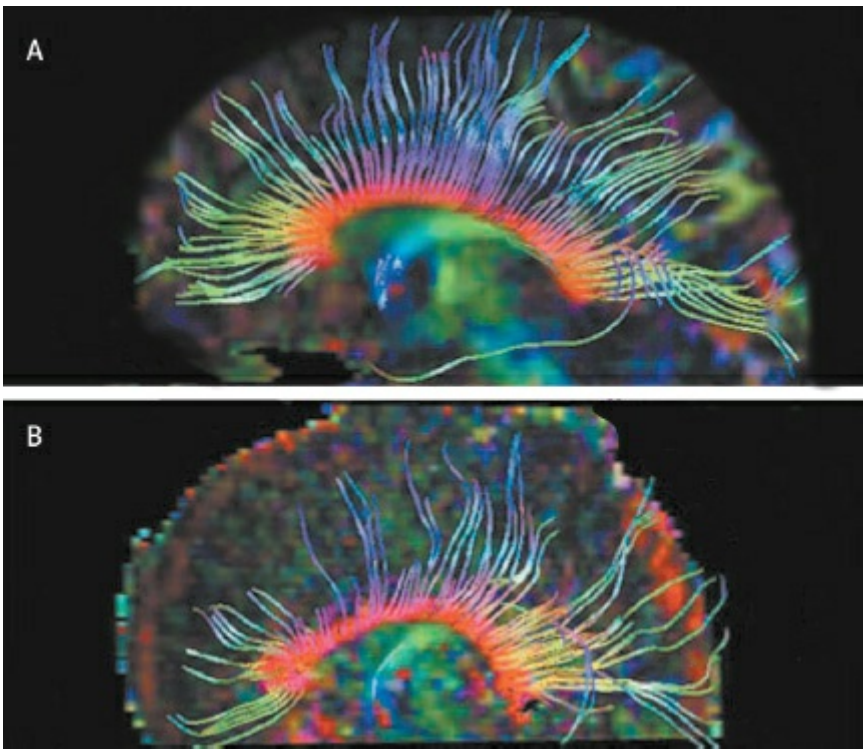


Figura 4.12A. Tractografía de las fibras comisurales del cuerpo calloso en un voluntario de 21 años de edad.
Figura 4.12B. Tractografía de las fibras comisurales del cuerpo calloso en un paciente de edad similar con antecedente de envenenamiento por monóxido de carbono. Se observa la rodilla, el

cuerpo y el esplenio del cuerpo calloso. **Fuente:** adaptada de (3).

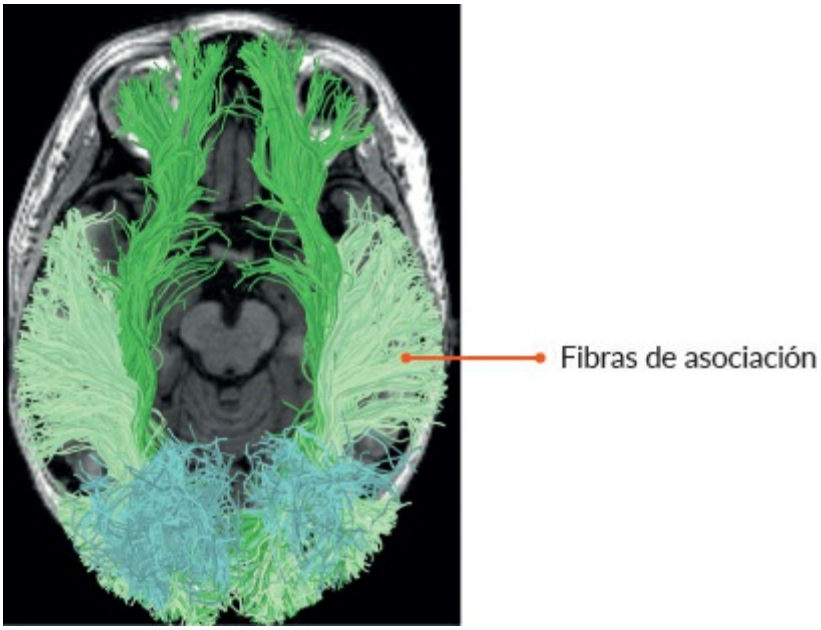


Figura 4.13. Tractografía de fascículos constituidos por fibras de asociación. **Fuente:** adaptada de (4).

El núcleo caudado es de gran tamaño y su porción anterior, denominada cabeza, se relaciona con el cuerno anterior (frontal) del ventrículo lateral. Después de la cabeza, el cuerpo de este núcleo se orienta hacia atrás, rodeando el tálamo y formando el piso del cuerpo del ventrículo lateral. Luego, se hace más delgado y circunda la parte posterior del tálamo para terminar en el cuerno lateral (temporal) del ventrículo lateral. Esta porción final del núcleo se conoce como cola (figura 4.15). El putamen es uno de los núcleos más grandes. Su cara externa se relaciona con la cápsula externa —que es una lámina delgada de sustancia blanca— y su cara interna con el globo pálido. A su lado, se encuentra el claustro o antemuro, una capa delgada pero extensa de sustancia gris que tiene conexiones recíprocas con la corteza cerebral. Junto al claustro, se halla el lóbulo de la ínsula. El claustro está separado del putamen por la cápsula externa y del lóbulo de la ínsula, por la cápsula extrema (figura 4.15).

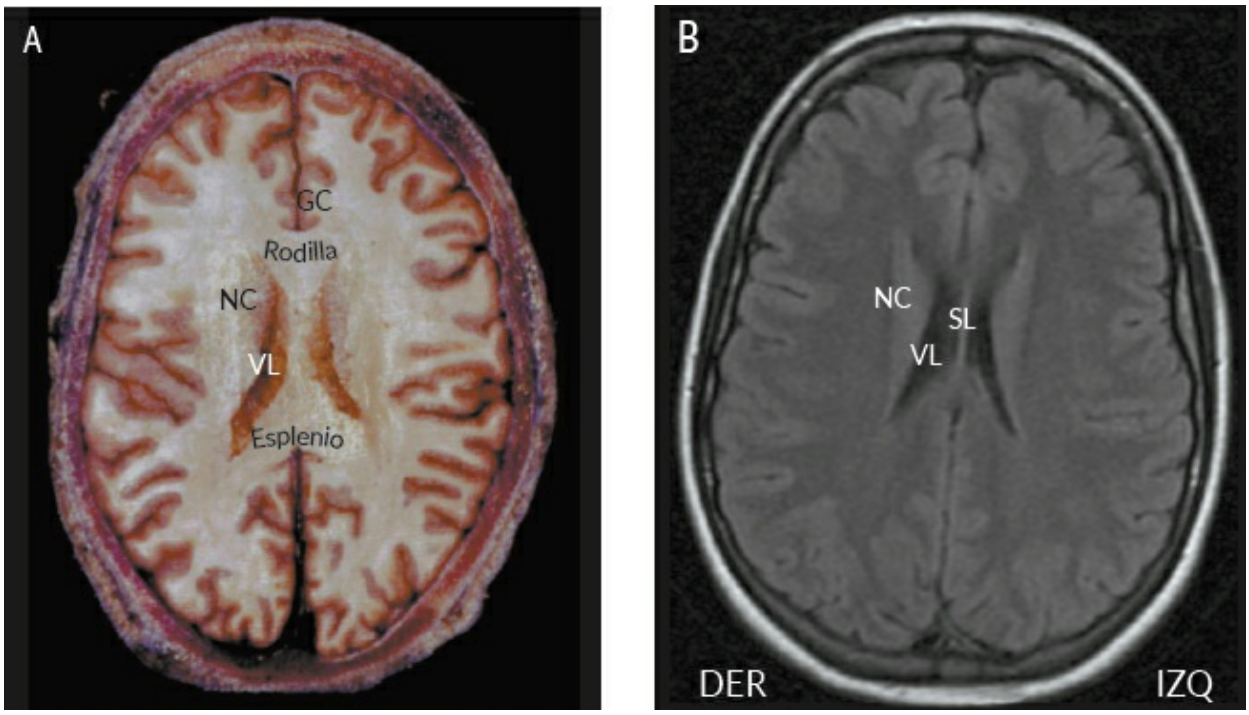


Figura 4.14A. Corte transversal anatómico del cerebro. VL: cuerpo del ventrículo lateral; GC: giro del cíngulo; NC: núcleo caudado

Figura 4.14B. IRM en FLAIR de corte similar al de la figura anterior. SL: septum lúcido.

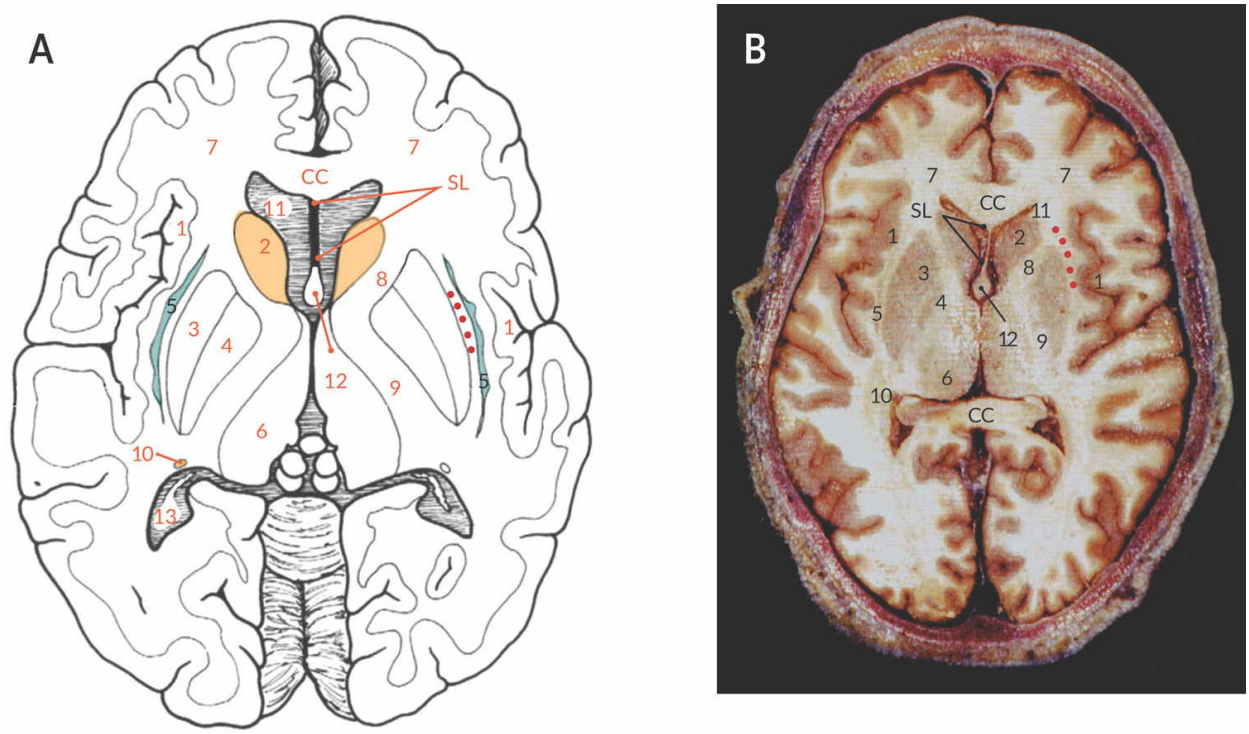


Figura 4.15A. Esquema de corte horizontal del cerebro. 1: corteza de la ínsula; 2: cabeza del núcleo caudado; 3: putamen; 4: globo pálido; 5: claustro o antemuro; 6: tálamo; 7: centro oval; CC: cuerpo calloso; 8: brazo anterior de la cápsula interna; 9: brazo posterior de la cápsula interna; •••••: cápsula externa; 10: cola del núcleo caudado; 11: cuerno frontal o anterior del ventrículo lateral; SL: septum lúcido; 12: fórnix; 13: cuerno occipital del ventrículo lateral.

Figura 4.15B. Corte anatómico horizontal del cerebro con algunas estructuras de la figura 4.15A.

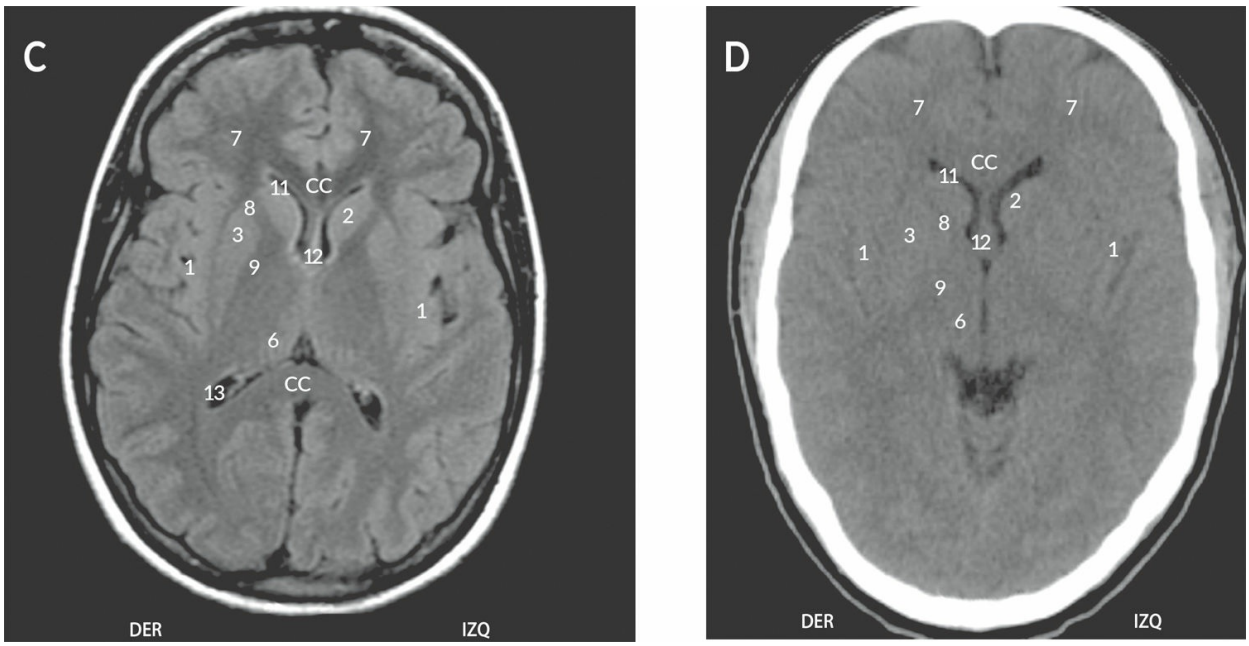


Figura 4.15C. IRM en FLAIR con algunas estructuras de la figura 4.15A.
Figura 4.15D. TAC cerebral simple de corte transversal con algunas estructuras de la figura 4.15A.

El globo pálido se encuentra entre la cara interna del putamen y la cápsula interna. Posee un segmento lateral y uno medial, separados entre sí por una lámina de sustancia blanca llamada lámina medular interna. La lámina medular externa separa el globo pálido del putamen. El globo pálido se encarga de llevar información desde los ganglios basales hacia otras regiones. En un corte horizontal, la cápsula interna tiene la forma de una V cuyo vértice se sitúa sobre la línea media. El brazo anterior se encuentra entre la cabeza del núcleo caudado y el núcleo lenticular; en algunos segmentos contiene bandas de sustancia gris que hacen puente entre la cabeza del núcleo caudado y el putamen. El brazo anterior contiene el tracto corticopóntico, que proviene de la región prefrontal, y fibras que conectan la corteza frontal con el tálamo en forma bidireccional. El vértice de la V se conoce como rodilla de la cápsula interna. El brazo posterior, que separa el núcleo lenticular del tálamo, contiene el tracto corticoespinal (vía piramidal) y las radiaciones sensitivas que provienen del tálamo y terminan en la corteza somatosensorial del giro postcentral. El haz corticoespinal transporta información motora desde la corteza cerebral hasta el cordón espinal, el cual hace relevo de esta información para garantizar el movimiento del hemicuerpo contralateral.

Además de estas estructuras, se identifican dos porciones de los ventrículos laterales en ambos hemisferios: el cuerno frontal o anterior, limitado adelante por la rodilla del cuerpo calloso y en su cara externa, por la cabeza del núcleo caudado, y el cuerno occipital o posterior, limitado atrás por el esplenio del cuerpo calloso (figura 4.16).

En cortes horizontales más inferiores, se puede observar el lóbulo temporooccipital y la porción profunda de T5, en la que se encuentra el

hipocampo (formación hipocampal) y el complejo amigdalino (figura 4.17). Además, se identifica el cuerno temporal del ventrículo lateral. La formación hipocampal está compuesta por: el subículo, el hipocampo propio o asta de Ammon, y el giro dentado. La corteza del giro parahipocampal continúa en el subículo, que a su vez se prolonga en el hipocampo propio. Los axones originados en el hipocampo convergen para formar la fimbria (inicio del fórnix), que continúa en el pilar posterior del fórnix. El complejo amigdalino, comúnmente llamado amígdala, se localiza en la zona profunda del uncus hipocampal. El tapetum corresponde a una capa de fibras nerviosas (sustancia blanca) y forma el techo del cuerno lateral o temporal del ventrículo lateral.

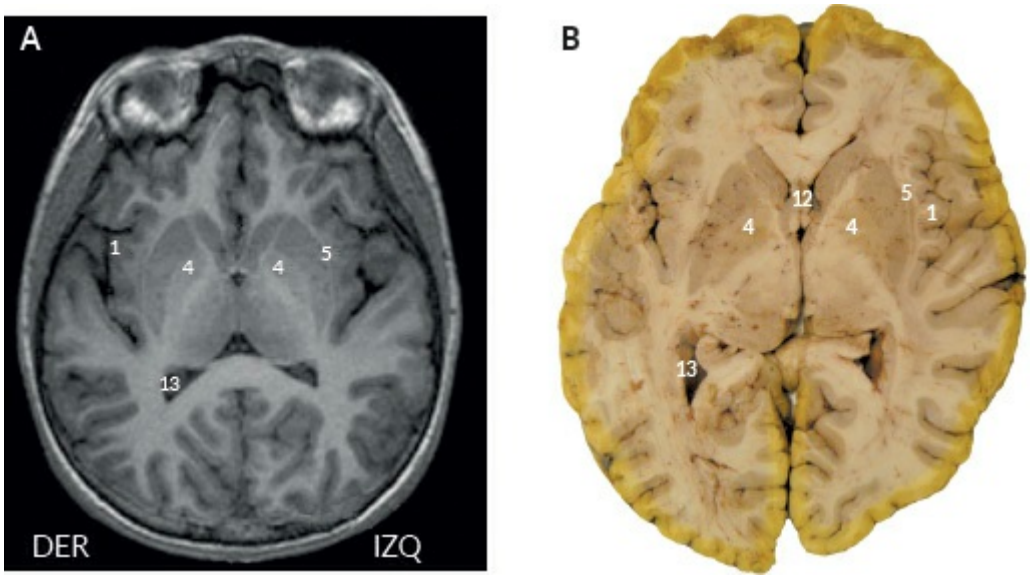


Figura 4.16A. IRM en T1 (T1-WI) de corte horizontal cerebral. 1: corteza de la ínsula; 4: globo pálido; 5: claustro o antemuro; 13: cuerno occipital o posterior.

Figura 4.16B. Corte anatómico horizontal cerebral más inferior que el de la figura anterior. 1: corteza de la ínsula; 4: globo pálido; 5: claustro o antemuro; 12: fórnix; 13: cuerno occipital o posterior.

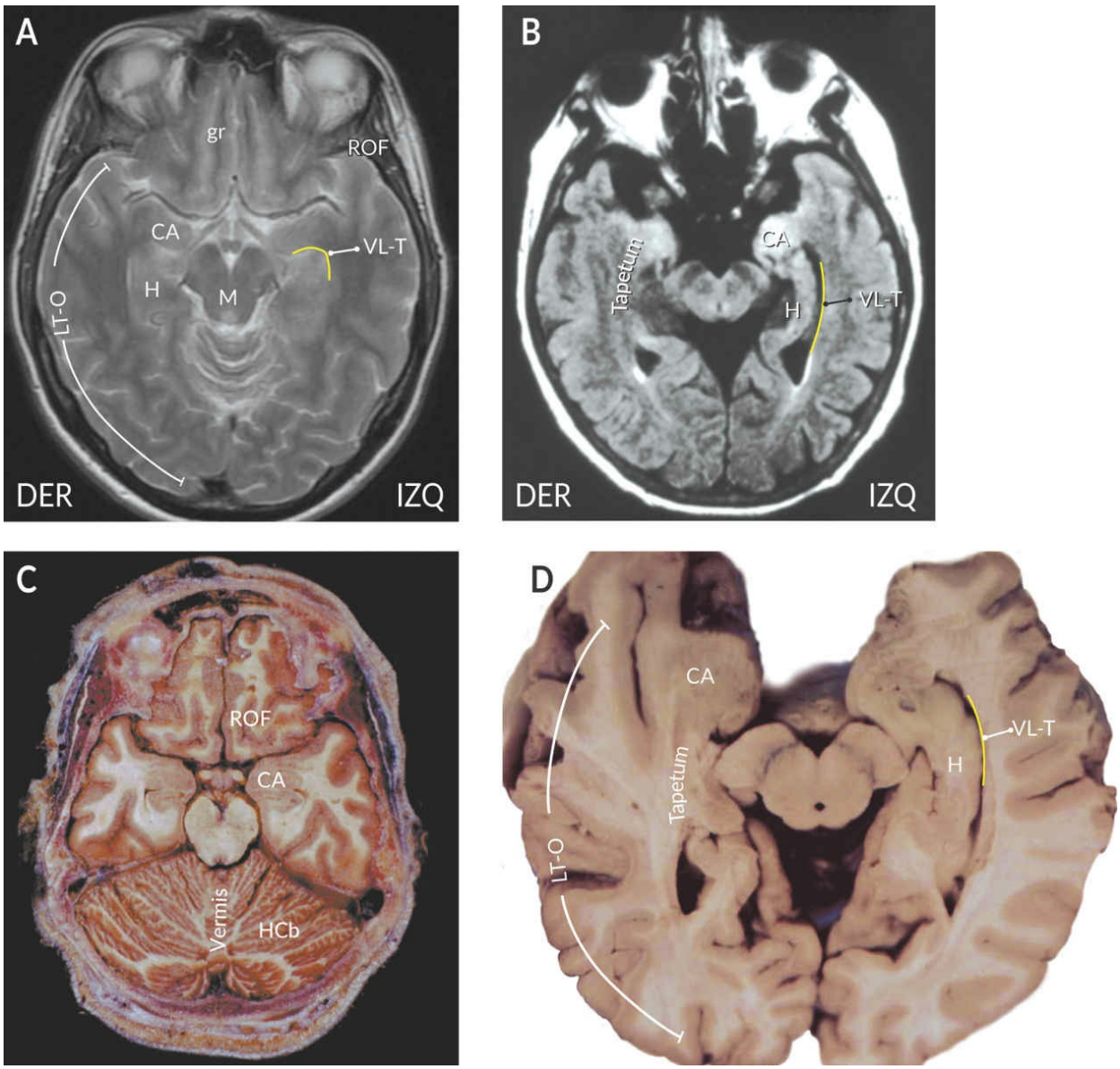


Figura 4.17A. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal a nivel del mesencéfalo. M: mesencéfalo; LT–O: lóbulo temporooccipital; ROF: región orbitofrontal; gr: giro recto; H: hipocampo; CA: complejo amigdalino; VL–T: cuerno temporal o lateral del ventrículo lateral.
Figura 4.17B. IMR en T1 (T1-WI) de corte transversal a nivel del mesencéfalo. Tapetum: sustancia blanca que cubre el VL–T y forma el techo del cuerno lateral.
Figura 4.17C. Corte anatómico transversal más inferior que las figuras anteriores. HCb: hemisferio cerebeloso, CA: complejo amigdalino; ROF: región orbitofrontal.
Figura 4.17D. Corte anatómico que corresponde a la IRM de la figura 4.17B.

Ejercicios clínicos

Caso 1

Un paciente de 54 años ingresa al servicio de urgencias por presentar cefalea

(dolor de cabeza) súbita y déficit neurológico. Se realiza una TAC cerebral simple que revela una lesión hiperdensa en el hemisferio izquierdo interpretada como una hemorragia (figura 4.18). ¿Qué núcleo se afectó?

Figura 4.18. TAC cerebral simple que revela lesión en el putamen del hemisferio izquierdo.

Caso 2

Un paciente de 67 años ingresa al servicio de urgencias por presentar movimientos anormales de inicio súbito. Según la IRM de la figura 4.19, ¿en qué núcleo está la lesión?

Figura 4.19. IRM en FLAIR de corte transversal cerebral que muestra lesión en la cabeza del núcleo caudado del hemisferio izquierdo.

Caso 3

Un paciente de 56 años con antecedentes de hipertensión arterial ingresa al servicio de urgencias por presentar un súbito déficit neurológico. Dado que una TAC cerebral simple (figura 4.20A) no muestra hallazgos anormales, se realizan dos IRM (figuras 4.20B y C). Según la figura 4.20B, ¿en qué región del hemisferio cerebral se localiza la lesión? De acuerdo con la figura 4.20C, ¿qué déficit neurológico presentará este paciente?

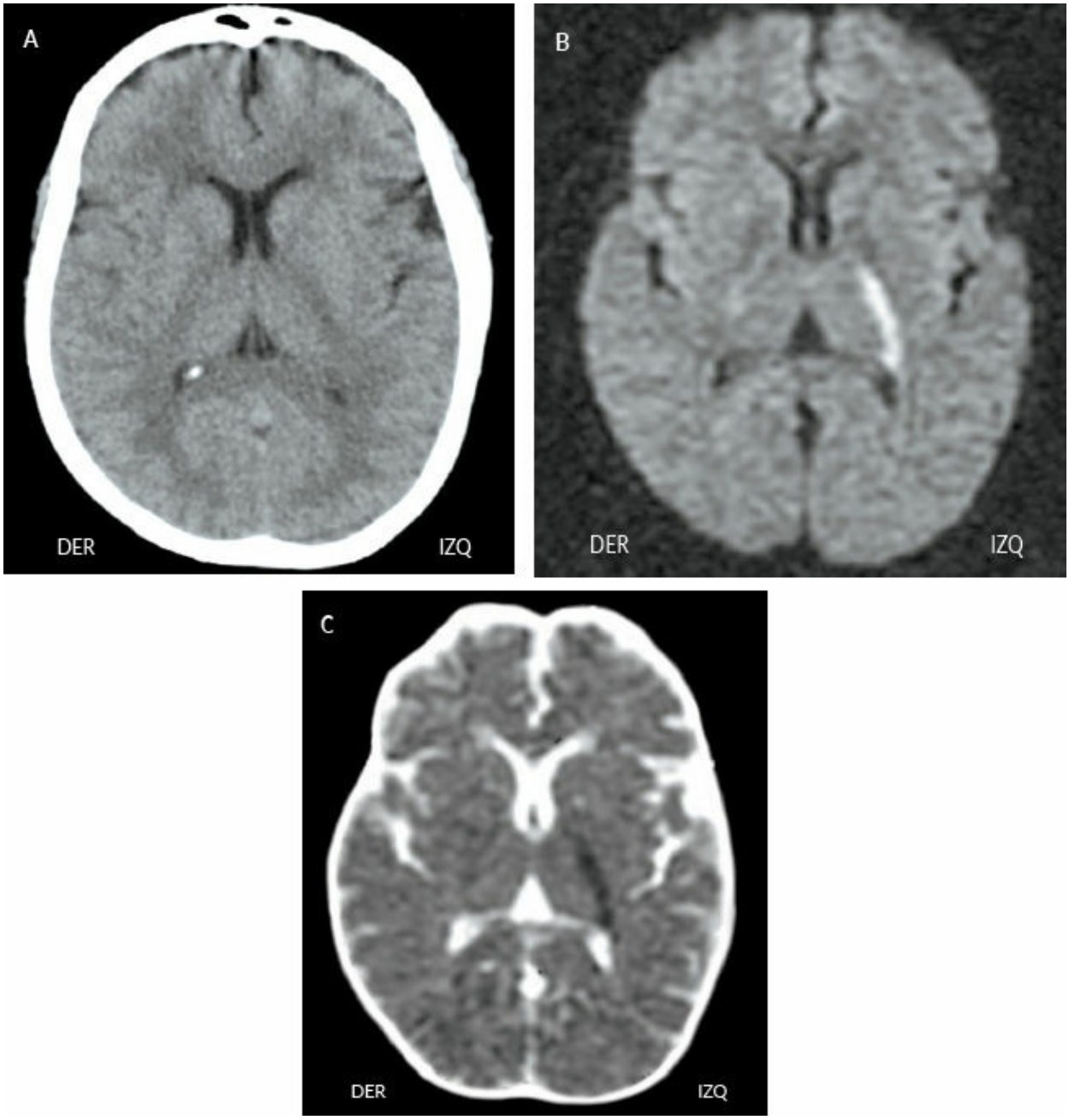


Figura 4.20A. TAC cerebral simple de corte transversal cerebral.
Figura 4.20B. IRM en difusión que muestra lesión en el brazo posterior de la cápsula interna del

hemisferio izquierdo.
Figura 4.20C. IRM en mapa ADC que muestra hallazgos compatibles con infarto cerebral agudo que genera déficit motor y sensitivo del hemicuerpo del lado opuesto a la lesión.

Cortes coronales

Estos cortes se llevan a cabo desde la porción frontal del cerebro hacia atrás. A medida que se avanza en dirección antero–posterior, se identifican las estructuras ya señaladas en los cortes horizontales. A continuación, se presenta una secuencia de estos cortes.

La figura 4.21A corresponde a un corte coronal anterior donde se aprecian los globos oculares, algunos músculos extrínsecos del ojo —como el recto interno y el oblicuo inferior—, el tabique nasal — entre los globos oculares y hacia abajo— y la mucosa de los cornetes —a los lados del tabique—. Encima de los globos oculares se observan los dos lóbulos frontales, con sus caras lateral, medial e inferior (región orbitofrontal). La figura 4.21B es un corte más posterior. No se observan los globos oculares, pero se aprecian los dos lóbulos frontales y sus tres caras con más volumen. Debajo de la región orbitaria (cara inferior) se identifica la porción anterior de los lóbulos temporales, separados de los frontales por el surco lateral. Hacia la línea media de la región orbitofrontal se encuentra el giro recto.

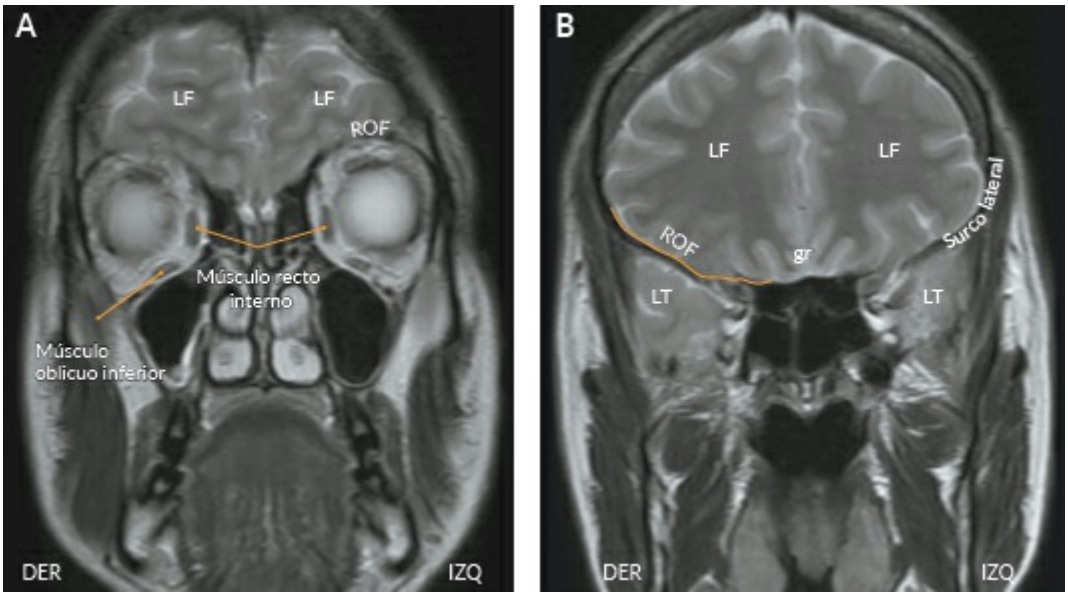


Figura 4.21A. IRM en T2 (T2–WI) de corte coronal anterior. LF: lóbulo frontal; ROF: región orbitofrontal.
Figura 4.21B. IRM en T2 (T2–WI) de corte coronal más posterior que el de la figura anterior. LT: lóbulo temporal; gr: giro recto.

La figura 4.22A corresponde al corte coronal de una pieza anatómica, en el que se distingue la parte anterior de los dos hemisferios cerebrales, que están unidos por la rodilla del cuerpo calloso. Encima de esta, se observa el

surco interhemisférico y el lobulillo o giro del cíngulo. Debajo de la rodilla, se advierte la región subcallosa, que hace parte de la región septal descrita en la cara medial. En la cara inferior del lóbulo frontal, hacia la línea media, se halla el giro recto, y hacia los extremos, la región orbitofrontal. Debajo de la región orbitaria se encuentra el surco lateral y la parte anterior del lóbulo temporal. La figura 4.22B corresponde a una IRM en secuencia T1 (T1–WI) con el mismo corte de la figura anterior. Además de las estructuras ya señaladas, se aprecia la porción anterior de los ventrículos laterales, es decir, los cuernos frontales, y los lóbulos temporales separados de los frontales por el surco lateral.

La figura 4.23 corresponde a un corte coronal a nivel de los cuernos frontales de los ventrículos laterales. Justo debajo del cuerpo calloso, en la línea media, se identifica el septum lúcido, tabique sin neuronas que separa los cuernos anteriores de los cuerpos de los ventrículos laterales. Como se aprecia, el cuerno frontal tiene como pared medial el septum lúcido, como techo el cuerpo del cuerpo calloso, y como pared lateral la cabeza del núcleo caudado. Debajo del septum lúcido se encuentra parte de la región subcallosa (región septal) y se alcanzan a ver los nervios ópticos. Lateral e inferior a la cabeza del núcleo caudado, se encuentra una banda de sustancia blanca y el brazo anterior de la cápsula interna. Este contiene estrías de sustancia gris que unen la cabeza del núcleo caudado con el putamen, el cual se localiza al lado del brazo anterior de la cápsula interna. Por esta razón, al conjunto formado por el putamen y el núcleo caudado se le denomina estriado. En la zona inferior entre el putamen y la cabeza del núcleo caudado, se encuentra el núcleo accumbens. Debajo del núcleo accumbens se encuentra la sustancia innominada.

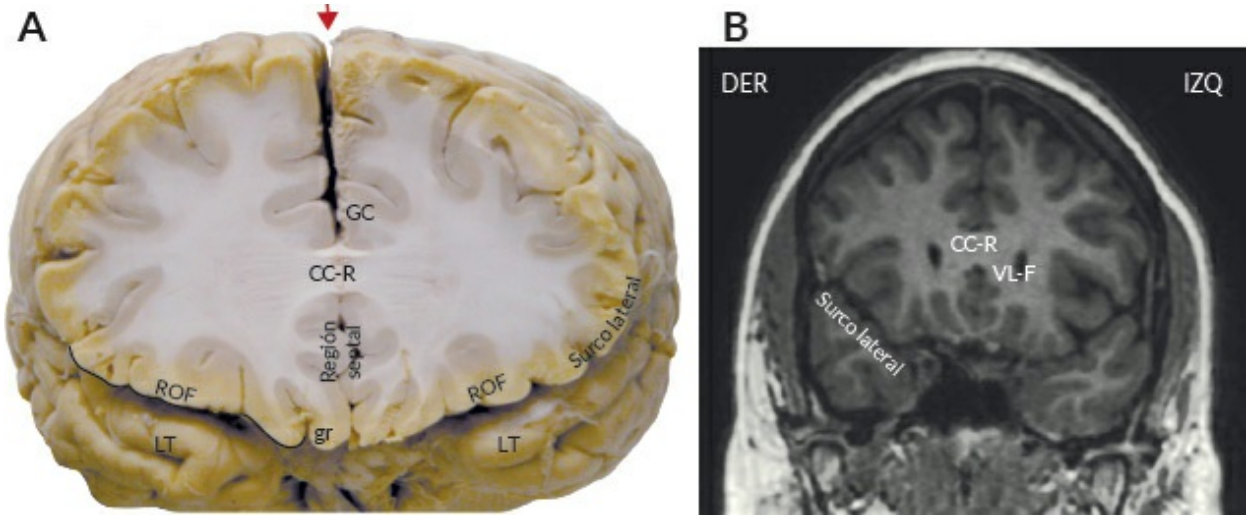


Figura 4.22A. Corte anatómico coronal anterior del cerebro. GC: giro del cíngulo; CC–R: rodilla del cuerpo calloso; ►: surco interhemisférico; ROF: región orbitofrontal; gr: giro recto; LT: lóbulo temporal.

Figura 4.22B. IRM en T1 (T1–WI) del mismo corte de la figura anterior. VL–F: cuerno frontal del ventrículo lateral.

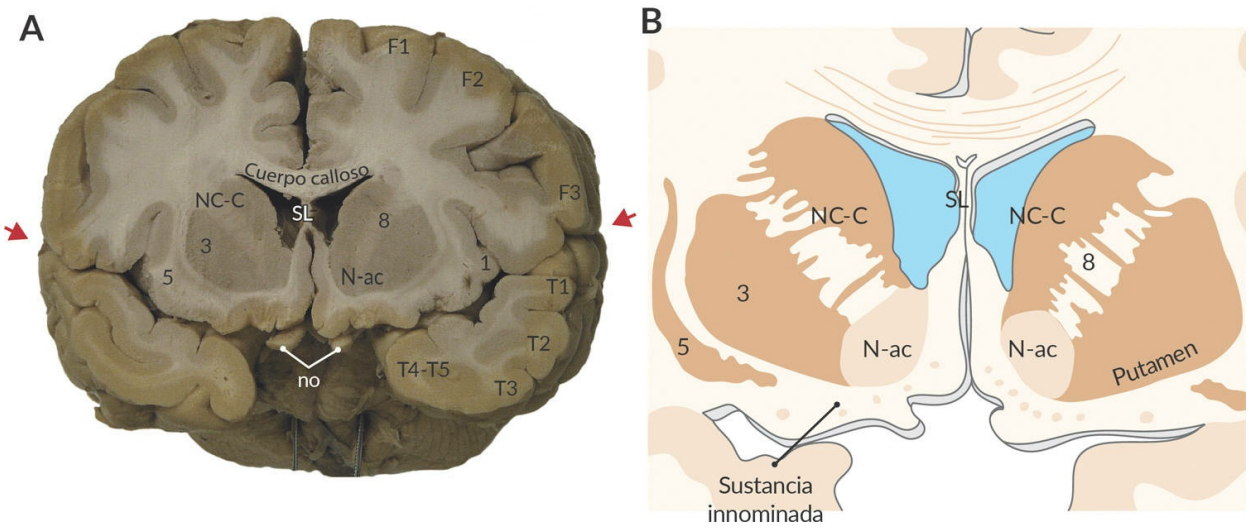


Figura 4.23A. Corte anatómico coronal a nivel de los cuernos frontales. SL: septum lúcido; NC–C: cabeza del núcleo caudado; N–ac: núcleo accumbens; 1: corteza de la ínsula; 3: putamen; 5: claustro o antemuro; 8: brazo anterior de la cápsula interna; no: nervios ópticos; ►: surco lateral.
Figura 4.23B. Esquema de un corte similar al de la figura anterior.

El núcleo accumbens recibe gran cantidad de fibras dopaminérgicas que provienen del tronco cerebral, el complejo amigdalino y el hipocampo. A su vez, proyecta fibras hacia la sustancia innominada, la sustancia negra y otras regiones del mesencéfalo. En el núcleo accumbens tienen lugar los procesos relacionados con el placer y la adicción inducidos por sustancias psicotrópicas como la nicotina. Al lado del putamen, se observa parte del claustro y la cápsula extrema, que lo separa de la corteza de la ínsula. En el lóbulo frontal se distinguen los giros F1, F2 y F3. Debajo de F3 aparece el surco lateral, que se ensancha a nivel del lóbulo de la ínsula. En el lóbulo temporal se identifican los giros T1, T2, T3 y parte de T4–T5.

La figura 4.24 corresponde a dos IRM de un corte coronal ligeramente más posterior que el de la figura 4.23. Se advierte el surco interhemisférico ocupado por la hoz del cerebro, que es una prolongación de la duramadre. La parte inferior de la hoz del cerebro se relaciona con el cuerpo calloso y la parte superior, con una cavidad de forma triangular llamada seno sagital —o longitudinal— superior (SSS), que hace parte del sistema venoso del encéfalo. Además de las estructuras descritas anteriormente, se observan los giros T1, T2, T3, T4 y T5. Al interior de este último, se identifica una masa de sustancia gris que corresponde al complejo amigdalino. Esto significa que el corte es a nivel del uncus del hipocampo.

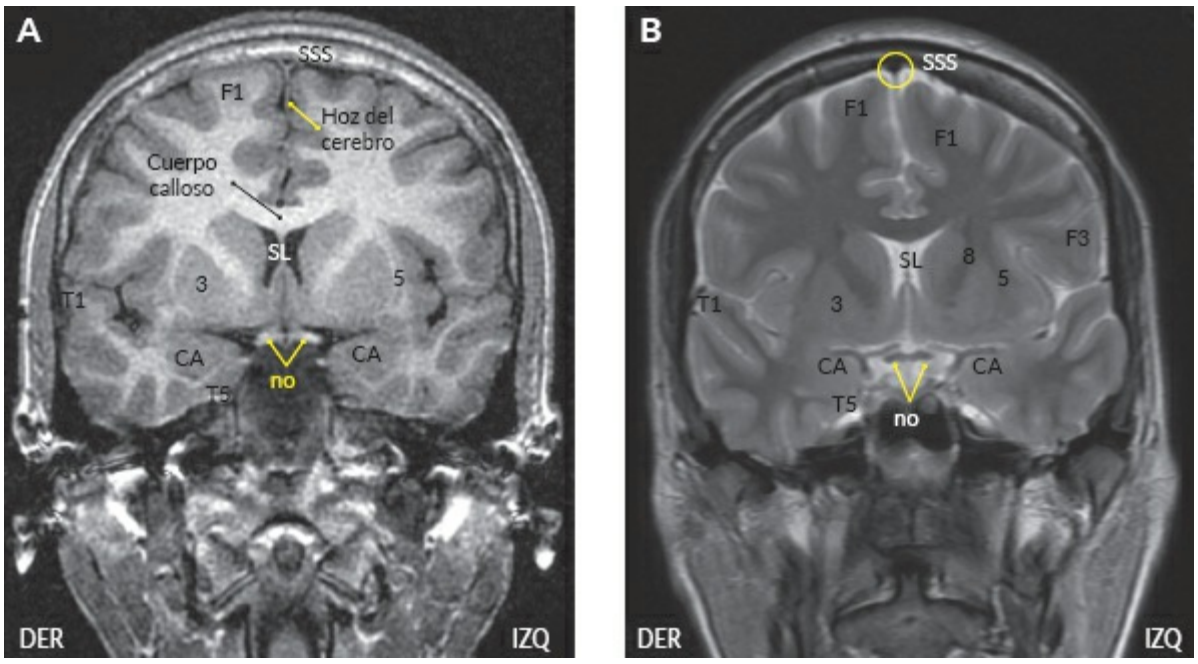


Figura 4.24A. IRM en T1 (T1–WI) de corte coronal cerebral. SSS: seno sagital superior; CA: complejo amigdalino; no: nervios ópticos; 3: putamen; 5: claustro o antemuro; SL: septum lúcido.
Figura 4.24B. IRM en T2 (T2–WI) de corte similar al de la figura anterior. 8: brazo anterior de la cápsula interna.

La figura 4.25A presenta una IRM en secuencia T2 (T2–WI) de un corte coronal más posterior que permite visualizar: el hipocampo (profundo a T5), el cuerno lateral o temporal del ventrículo lateral, las ramas terminales de la arteria basilar, las arterias cerebrales posteriores, y debajo de estas, el tercer par craneano. En la pieza anatómica de la figura 4.25B, se identifica el cuerpo del cuerpo calloso, que forma el techo de los ventrículos laterales (cuerpo del ventrículo lateral). Debajo de este y sobre la línea media, se encuentran los dos fórnices. Más abajo está el tercer ventrículo o cavidad medial, cuyas paredes laterales corresponden a los tálamos e hipotálamos. Se aprecia la comisura intertalámica que atraviesa el tercer ventrículo y los tubérculos mamilares que forman el piso de este. En el lóbulo temporal se identifican los giros T1, T2, T3, T4 y T5. Profundos a T5 se encuentran el hipocampo y el cuerno temporal del ventrículo lateral. Además, se distingue el subículo, que corresponde a la zona de transición entre el hipocampo, en un extremo, y la corteza del giro parahipocampal (T5), en el otro extremo. Sobre la superficie del hipocampo se aprecia una delgada capa de sustancia blanca denominada alveus, que contiene fibras nerviosas provenientes del hipocampo que se dirigen hacia el fórnix. Dentro del hipocampo se localiza el giro dentado.

Las figuras 4.26A y B corresponden a cortes coronales a nivel del tronco cerebral en los que se muestran sus tres porciones: el mesencéfalo (entre los dos giros T5), el puente o protuberancia y la médula oblongada, bulbo raquídeo o medula. La cara anterior del mesencéfalo está formada por los pedúnculos cerebrales, que son dos columnas ubicadas entre el puente y los hemisferios cerebrales. En la cara posterior, se encuentra la lámina colicular,

que está formada por los colículos superiores e inferiores.

En la figura 4.26A, se identifica el cuerpo del cuerpo calloso, que limita arriba con el giro del cíngulo y abajo con la porción posterior de los cuerpos de los ventrículos laterales, cuyo piso es formado en parte por los tálamos. En general, los núcleos de los tálamos cumplen funciones de relevo e integración de la información que viaja desde diferentes regiones del sistema nervioso central hacia la corteza cerebral, y desde diferentes regiones corticales cerebrales hacia los tálamos. Sobre la línea media y debajo del cuerpo calloso, se encuentran los pilares posteriores de los fórnices, que rodean los tálamos. La cara inferior de los lóbulos temporales está separada de los hemisferios cerebelosos por una prolongación de la duramadre llamada tentorio o tienda del cerebelo, cuyos bordes fijo y libre se relacionan con el peñasco del hueso temporal y el mesencéfalo, respectivamente. Aunque el hipocampo es menos voluminoso, se alcanza a apreciar el alveus rodeando al giro dentado. También se distingue la región del subículo. En el mesencéfalo y hacia la línea media, se localiza el acueducto cerebral, y a ambos lados de este, los pedúnculos cerebrales.

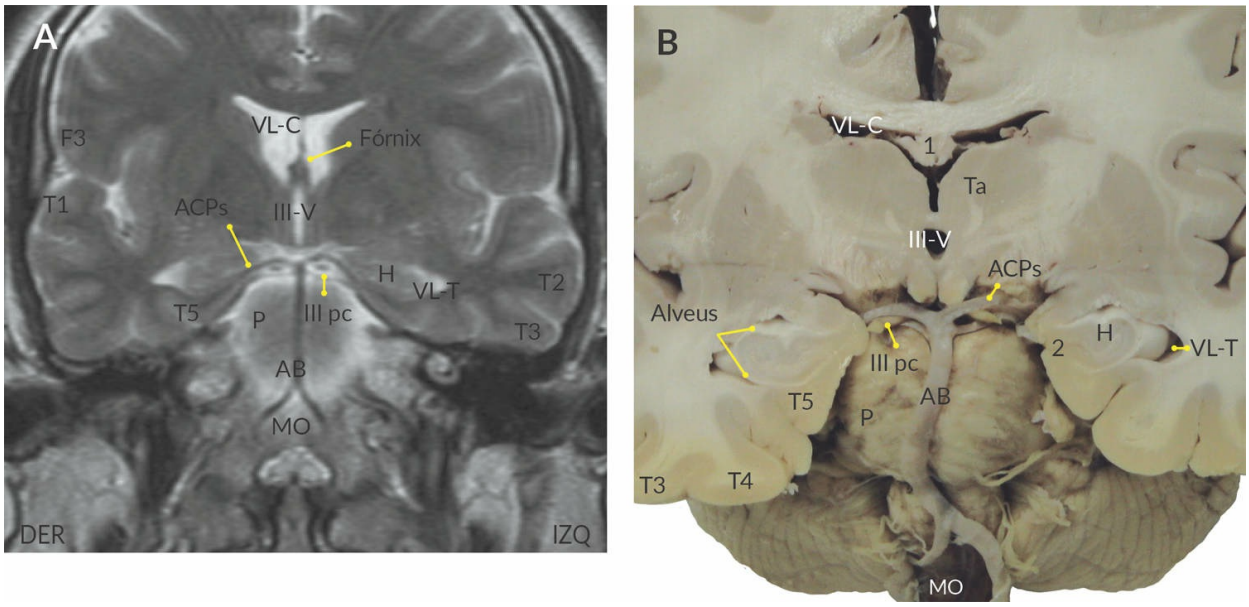


Figura 4.25A. IRM en T2 (T2–WI) de corte coronal cerebral. VL–C: cuerpo del ventrículo lateral; ACPs: arterias cerebrales posteriores; III–V: tercer ventrículo; H: hipocampo; VL–T: cuerno temporal del ventrículo lateral; III pc: tercer par craneano; P: puente; AB: arteria basilar; MO: médula oblongada.

Figura 4.25B. Corte anatómico coronal similar al de la figura anterior. 1: fórnix; 2: subículo; Ta: tálamo.

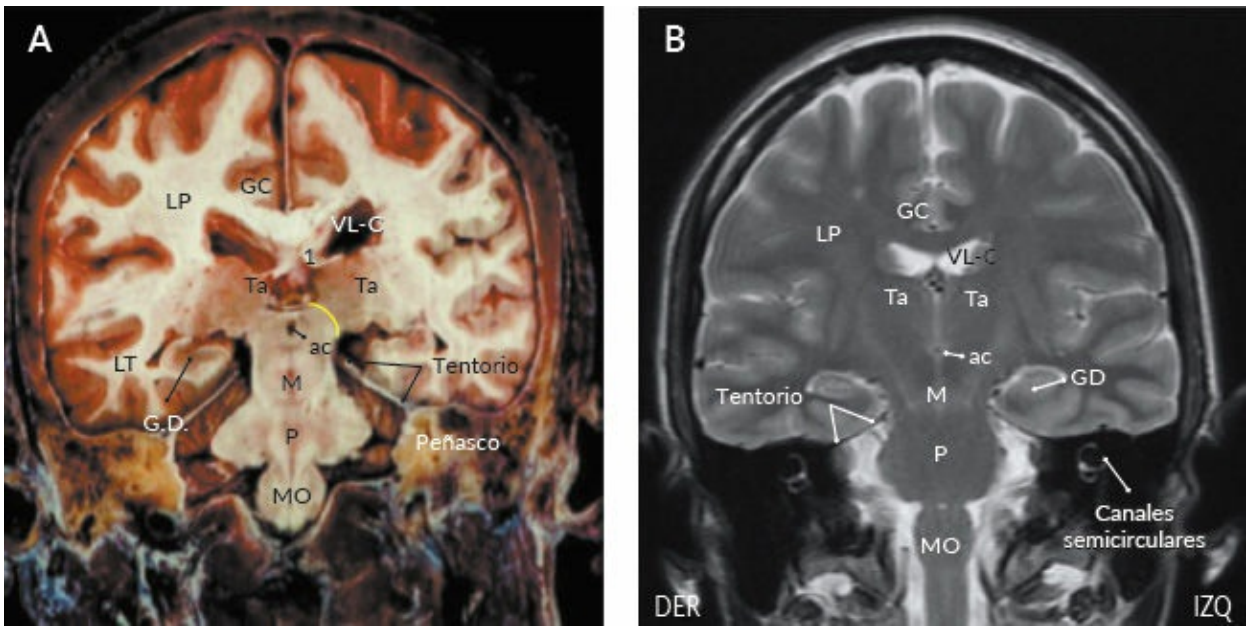


Figura 4.26A. Corte anatómico coronal a nivel del tronco cerebral. M: mesencéfalo; P: puente; MO: médula oblongada; GC: giro del cíngulo; VL–C: cuerpo del ventrículo lateral; 1: fórnix; Ta: tálamo; LP: lóbulo parietal; LT: lóbulo temporal; GD: giro dentado; ac: acueducto cerebral; línea amarilla: pedúnculo cerebral.

Figura 4.26B. IRM en T2 (T2–WI) de corte similar al de la figura anterior.

La figura 4.26B corresponde a una IRM en la que se distinguen algunas de las estructuras ya señaladas. El tentorio del cerebelo se aprecia como una línea gris y oblicua ubicada debajo del lóbulo temporal. Por ser una estructura ósea, el peñasco no aparece en la resonancia, en su lugar se ve un espacio negro debajo del lóbulo temporal. Dentro de lo que sería el peñasco del hueso temporal, se advierten los canales semicirculares del oído interno. Es necesario aclarar que, por la altura del corte, las circunvoluciones que se encuentran encima del lóbulo temporal, en una vista lateral, corresponden al lóbulo parietal. En la cara medial de ambos hemisferios se observa el lobulillo del cíngulo junto al cuerpo calloso y, por encima, el lóbulo parietal.

Las figuras 4.27A y B presentan IRM de cortes coronales realizados a nivel del cerebelo y la cara posterior del mesencéfalo. En la figura 4.27A, se identifican el lóbulo temporal y el lóbulo parietal de cada hemisferio. Además, debajo de la cara medial del lóbulo parietal, se observa el lobulillo del cíngulo, en relación con el esplenio del cuerpo calloso. En el borde superior del surco interhemisférico, se halla el seno sagital —o longitudinal— superior, y en el borde inferior, el esplenio del cuerpo calloso. Debajo del esplenio, hay dos bandas diagonales de sustancia blanca que corresponden a los pilares posteriores del fórnix. Debajo de cada hemisferio cerebral, se localizan el tentorio del cerebelo y los hemisferios cerebelosos. Cada hemisferio cerebeloso presenta una cara superior ligeramente aplanada y una cara inferior más voluminosa. Hacia la línea media, en la cara inferior de los hemisferios cerebelosos, se encuentran las amígdalas cerebelosas, y en la

línea media, el vermis del cerebelo. Encima de la cara superior del cerebelo y sobre la línea media, se distinguen cuatro masas redondas. Las inferiores, que lucen más hipointensas y están rodeadas por líquido cefalorraquídeo, corresponden a los colículos inferiores y, por encima, los colículos superiores, que forman la cara posterior del mesencéfalo. Teniendo en cuenta los cortes anteriores, ¿a qué estructura correspondería el espacio entre los dos tálamos que está encima del mesencéfalo?

La figura 4.27B es un corte ligeramente más posterior que el anterior. Se distinguen los hemisferios cerebrales, los cuernos occipitales y, entre ellos, el esplenio del cuerpo calloso. Encima del vermis del cerebelo y entre los giros T5, se visualiza un espacio que contiene líquido cefalorraquídeo. Respondiendo a la pregunta anterior, este espacio se denomina cisterna superior o ambiens, y es un ensanchamiento del espacio subaracnoideo.

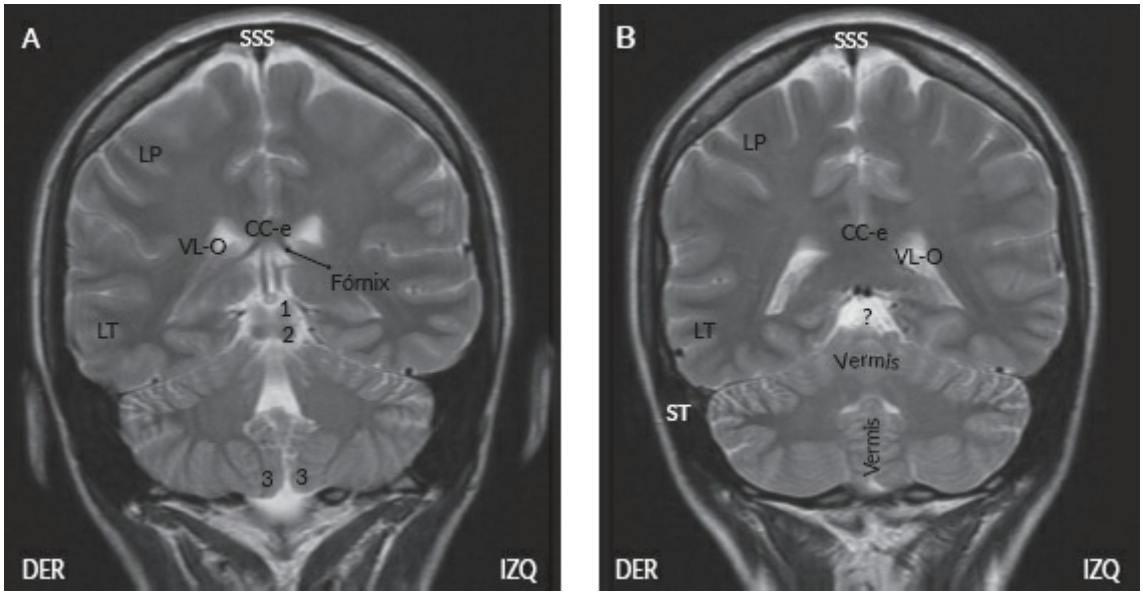


Figura 4.27A. IRM en T2 (T2–WI) de corte coronal a nivel del cerebelo. SSS: seno sagital superior; CC–e: esplenio del cuerpo calloso; VL–O: cuerno occipital del ventrículo lateral; LP: lóbulo parietal; LT: lóbulo temporal; 1: colículos superiores; 2: colículos inferiores; 3: amígdalas cerebelosas.
Figura 4.27B. IRM en T2 (T2–WI) de corte coronal más posterior que el de la figura anterior. ST: seno transverso.

En cortes más posteriores, ya no es posible distinguir los cuernos occipitales de los ventrículos laterales ni el cuerpo calloso. En la pieza anatómica de la figura 4.28A, se observa la hoz del cerebro, que separa los hemisferios cerebrales entre sí, y el tentorio o tienda del cerebelo, que separa los hemisferios cerebrales de los hemisferios cerebelosos. En los sitios donde nacen las prolongaciones meníngeas, se localizan los senos venosos. En el extremo superior de la hoz del cerebro se halla el seno sagital superior, y en el extremo inferior, el seno recto. En los bordes laterales del tentorio, se identifican los senos transversos, que por el corte adquieren una forma triangular. También se muestran las caras laterales de los lóbulos parietales y, en la cara medial de cada hemisferio, el surco calcarino. Debajo de este se

encuentra el giro lingual y encima, la cuña. En el cerebelo, se aprecia la sustancia blanca ramificada también llamada árbol de la vida. En la IRM de la figura 4.28B también es posible observar las estructuras descritas anteriormente. Aunque las prolongaciones meníngeas no resultan tan visibles como en el corte anatómico, se nota la presencia de los senos venosos.

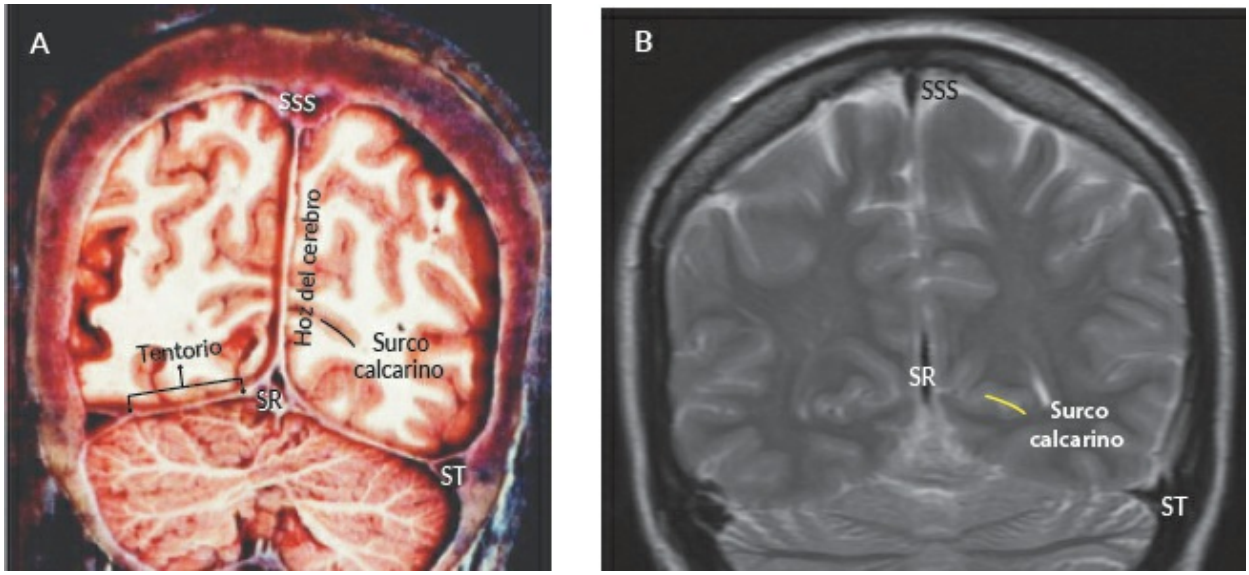


Figura 4.28A. Corte anatómico coronal en el que se aprecian las prolongaciones de la duramadre. SSS: seno sagital superior; SR: seno recto; ST: seno transverso.
Figura 4.28B. IRM en T2 (T2–WI) de corte coronal similar al de la figura anterior.

Sistema ventricular

Dentro de cada hemisferio cerebral hay un ventrículo lateral. Cada ventrículo lateral se comunica con el tercer ventrículo a través del agujero interventricular o de Monro. El agujero interventricular está limitado adelante por el pilar anterior del fórnix y atrás, por la porción anterior del tálamo. A su vez, el tercer ventrículo se comunica con el cuarto ventrículo a través del acueducto cerebral (Silvio). El cuarto ventrículo se prolonga en el conducto del epéndimo del cordón espinal —con frecuencia obliterado en adultos— y se comunica con el espacio subaracnoideo a través de los agujeros laterales y el agujero medial.

Cada ventrículo lateral se divide en cinco secciones: 1) el cuerno anterior o frontal, que se halla en el lóbulo frontal en posición ventral respecto al agujero interventricular; 2) el cuerpo, que se extiende por detrás del agujero interventricular hasta el esplenio del cuerpo calloso; 3) el cuerno posterior u occipital, que se proyecta hacia atrás en el lóbulo occipital; 4) el atrio o trígono, que es la unión entre el cuerpo, el cuerno temporal y el cuerno occipital; y 5) el cuerno temporal o inferior, que se dirige hacia la zona anteroinferior y se interna en el lóbulo temporal (figura 4.29).

El tercer ventrículo es una cavidad delgada que ocupa la línea media del diencéfalo. Su pared anterior está formada por la lámina terminalis, su pared lateral, por la cara medial del tálamo y el hipotálamo, su piso, por los hipotálamos, y su techo, por una capa delgada de tela coroidea que contiene el plexo coroideo (figura 4.30). En su parte posterior, el tercer ventrículo se continúa en el acueducto cerebral, que constituye la cavidad del mesencéfalo. El acueducto cerebral o de Silvio se prolonga hacia abajo en el cuarto ventrículo, que se sitúa entre el cerebelo y la médula. En este ventrículo se encuentran los agujeros o recesos laterales (Luschka) y el agujero medial (Magendie), que comunican el cuarto ventrículo con el espacio subaracnoideo. El techo del cuarto ventrículo está formado por el velo medular superior y el velo medular inferior, que tiene el agujero medial.

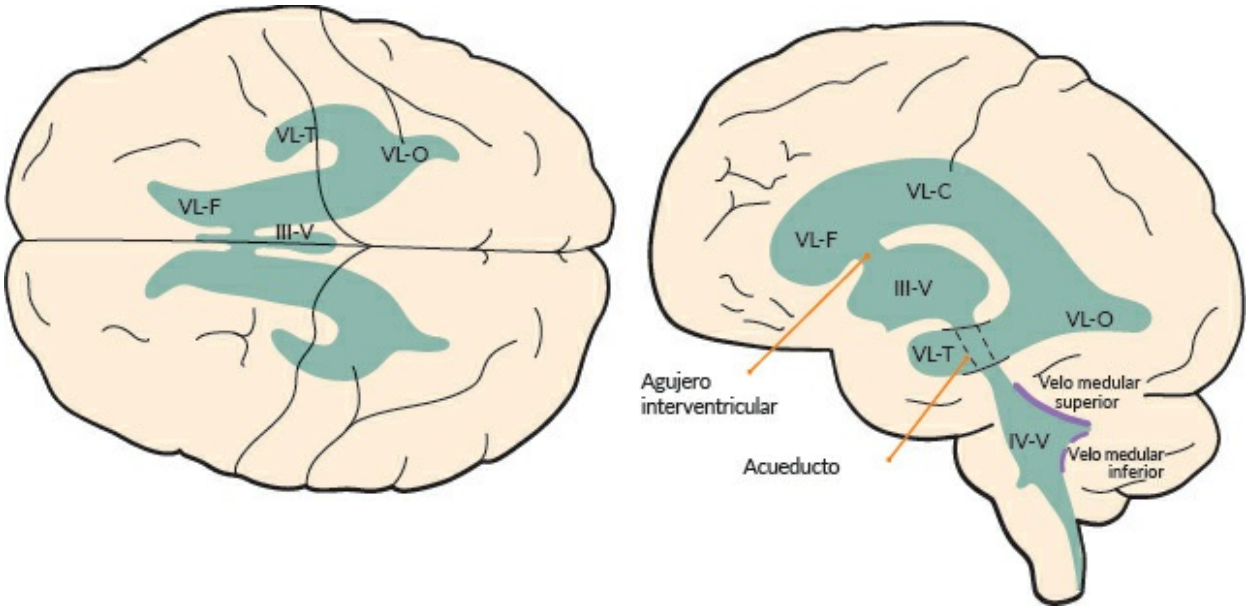


Figura 4.29. Esquema de proyección superior y lateral del sistema ventricular. VLF: cuerno frontal del ventrículo lateral; VL–T: cuerno temporal del ventrículo lateral; VL–O: cuerno occipital del ventrículo lateral; VL–C: cuerpo del ventrículo lateral; III–V: tercer ventrículo; IV–V: cuarto ventrículo.

Los cuatro ventrículos contienen los plexos coroideos. En ciertos lugares, el complejo piamadre–ependimoglía se invagina dentro de las cavidades ventriculares junto con un grupo de arteriolas, vénulas y capilares fenestrados y forman el plexo coroideo. La capa ependimaria está constituida por epitelio cuboidal (epitelio coroideo) y funciona como un epitelio secretor. El plexo coroideo de cada ventrículo lateral nace en el cuerno inferior, ocupa el cuerpo del ventrículo hasta alcanzar el agujero interventricular y continúa en el techo del tercer ventrículo. No hay plexo coroideo en el cuerno frontal, en el posterior ni en el acueducto cerebral. La invaginación del plexo coroideo hacia el ventrículo lateral se denomina fisura coroidea, y el espacio subaracnoideo relacionado con esta se llama fisura cerebral transversa o surco horizontal. En el cuarto ventrículo, el plexo coroideo se forma a partir

de la invaginación del velo medular inferior hacia la mitad inferior del cuarto ventrículo. Los plexos coroideos tienden a calcificarse con el paso de los años y pueden observarse en las TAC cerebrales.

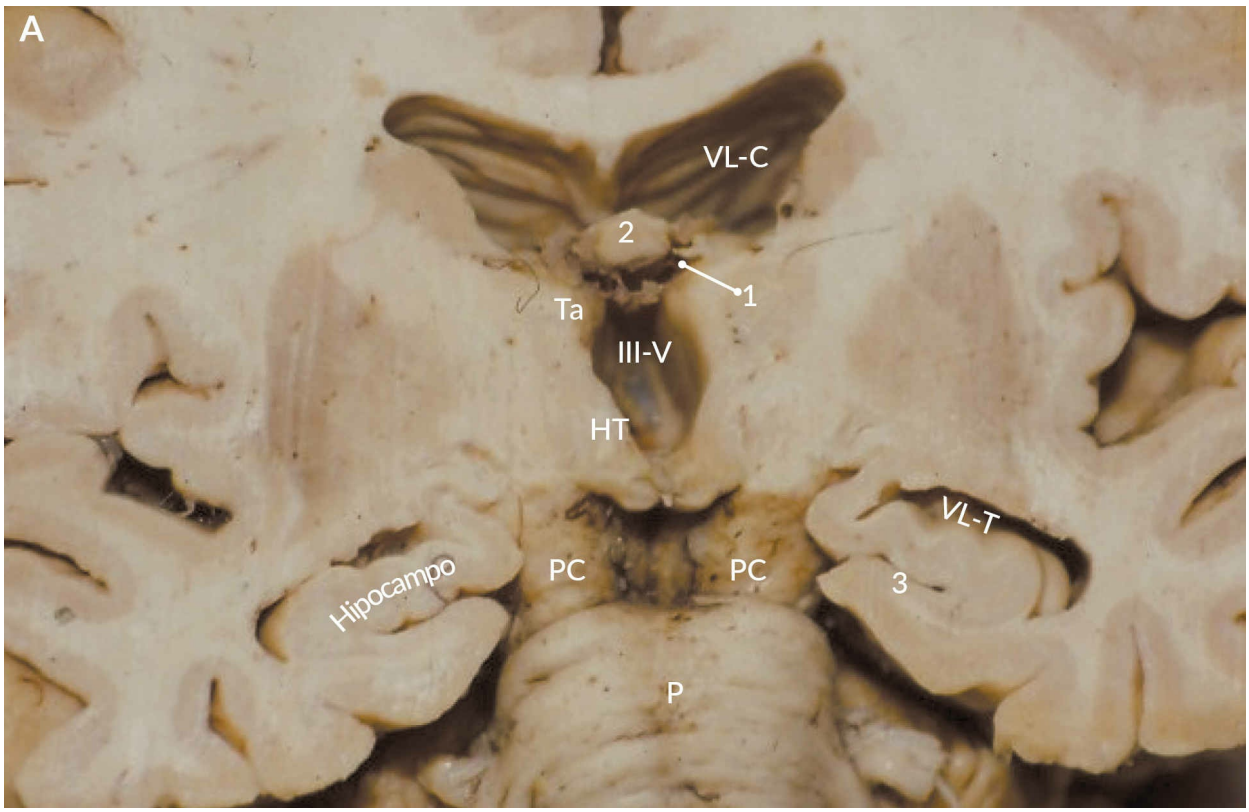


Figura 4.30A. Corte anatómico coronal con acercamiento al sistema ventricular. VL–C: cuerpo del ventrículo lateral; III–V: tercer ventrículo; VL–T: cuerno temporal del ventrículo lateral; Ta: tálamo; HT: hipotálamo; 1: agujero interventricular; 2: fórnix; 3: subículo; P: puente; PC: pedúnculo cerebral.

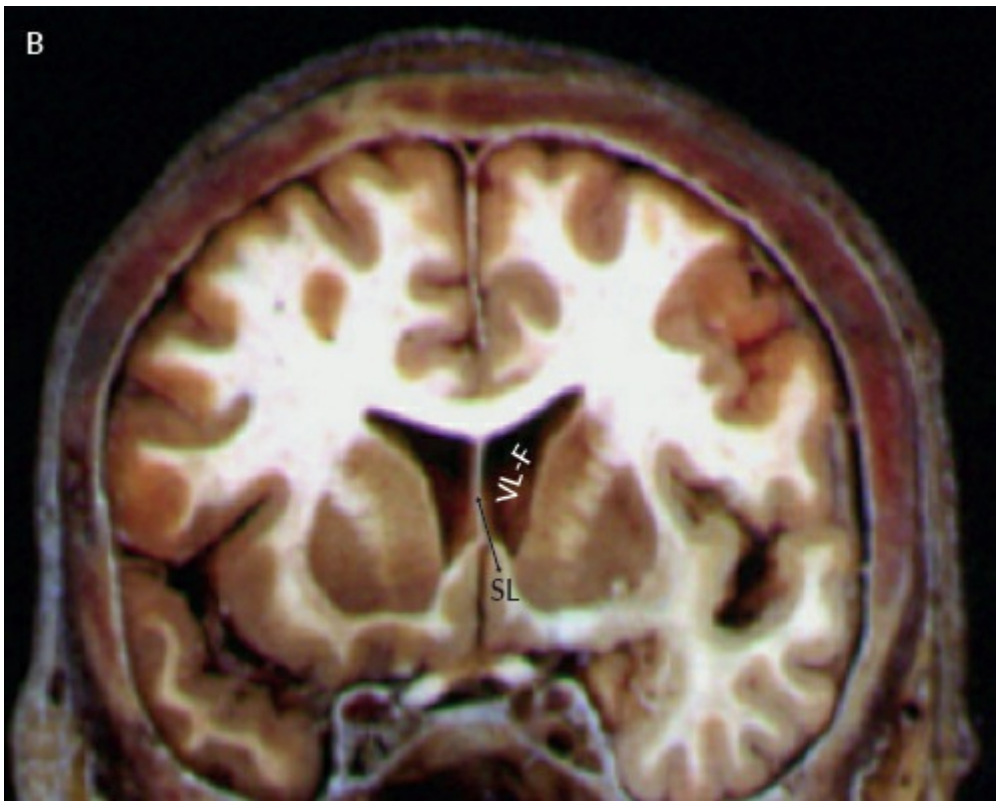


Figura 4.30B. Corte anatómico coronal cerebral. VL–F: cuerno frontal del ventrículo lateral; SL: septum lúcido.

Variante anatómica

El cavum del septum lúcido es una variante normal y corresponde a una cavidad localizada entre las dos láminas del septum lúcido. También se le llama quinto ventrículo, aunque no tiene comunicación con el sistema ventricular. Si se ubica detrás de los pilares anteriores del fórnix, se denomina cavum vergae (figura 4.31).

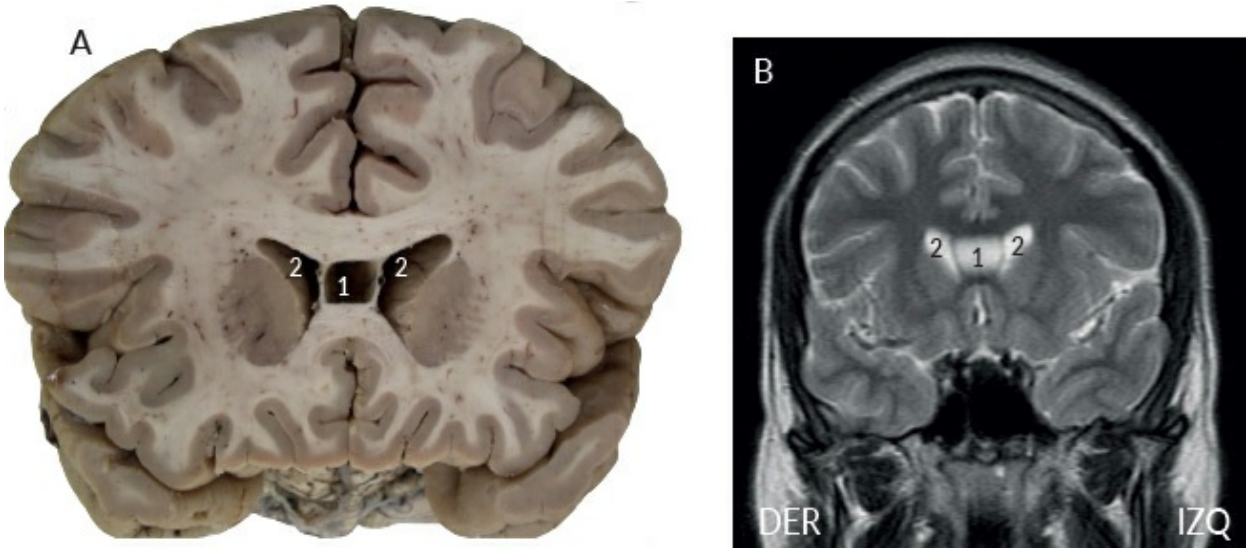


Figura 4.31A. Corte anatómico coronal cerebral. 1: cavum del septum lúcido; 2: cuerno frontal del ventrículo lateral.
Figura 4.31B. IRM en T2 (T2–WI) de corte coronal en la que se aprecia el cavum del septum lúcido a nivel de los cuernos frontales.

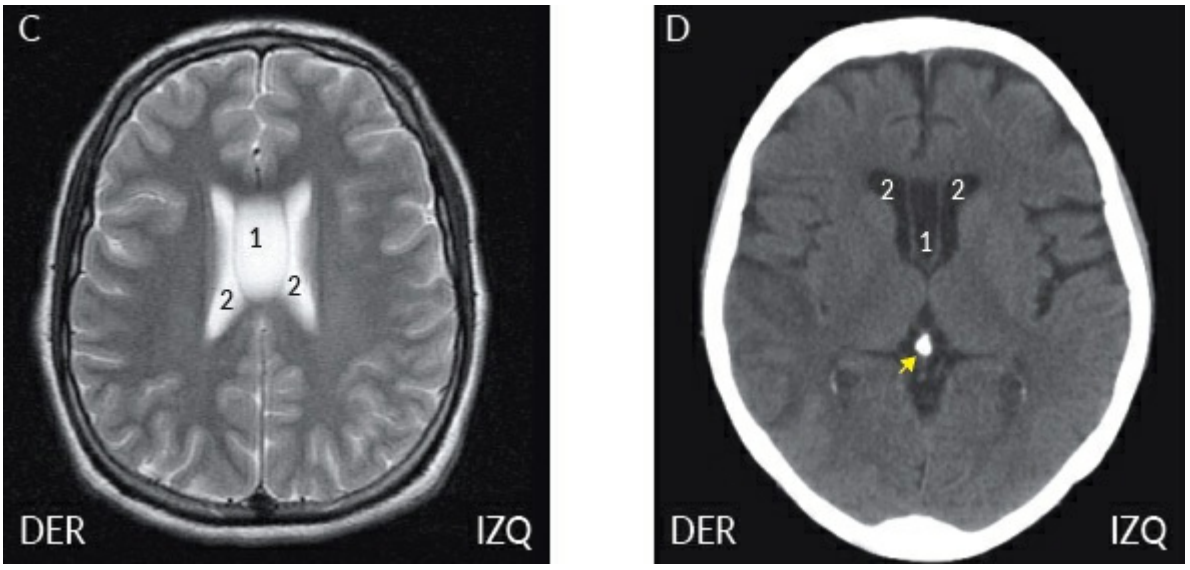


Figura 4.31C. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal que muestra el cavum del septum lúcido en relación con el esplenio del cuerpo calloso, por lo que recibe el nombre de cavum vergae.
Figura 4.31D. TAC cerebral simple de corte transversal que presenta el cavum del septum lúcido (con LCR) entre los cuernos frontales de los ventrículos laterales. Dentro de la cisterna ambiens se encuentra la glándula pineal calcificada (►).

Ejercicios clínicos

Caso 1

En el año 2007 se describió la encefalitis autoinmune asociada con anticuerpos anti–nmda. Un porcentaje alto de los pacientes que sufren esta enfermedad presenta tumores de ovario, de testículo u otros. Con el tiempo, se han descrito encefalitis asociadas a anticuerpos anti–ampa y anti–gabab. El cuadro clínico y los hallazgos en las IRM son similares a los de la figura 4.32.

Cerca del 70 % de los pacientes presentan síntomas prodrómicos (cefalea, fiebre y otros) que sugieren un proceso viral. Días después se desencadenan manifestaciones psiquiátricas, movimientos anormales y crisis convulsivas. La inmunoterapia temprana y resección del tumor (por ejemplo, teratoma del ovario) se han asociado con una recuperación neurológica significativa (5).

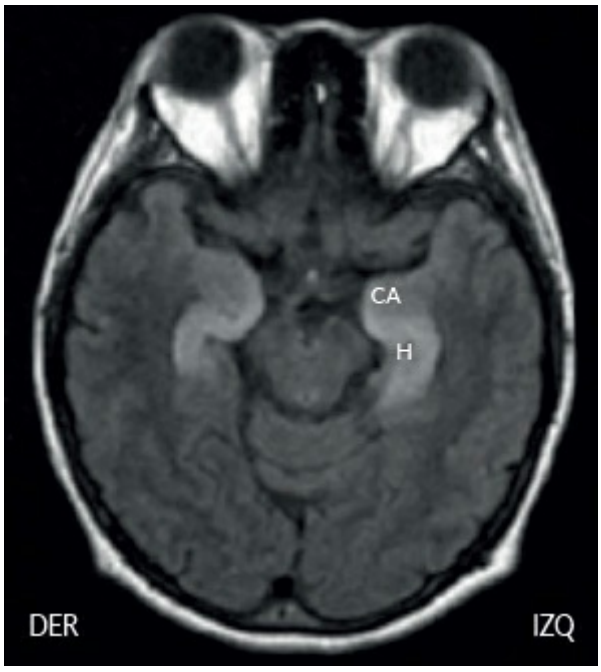
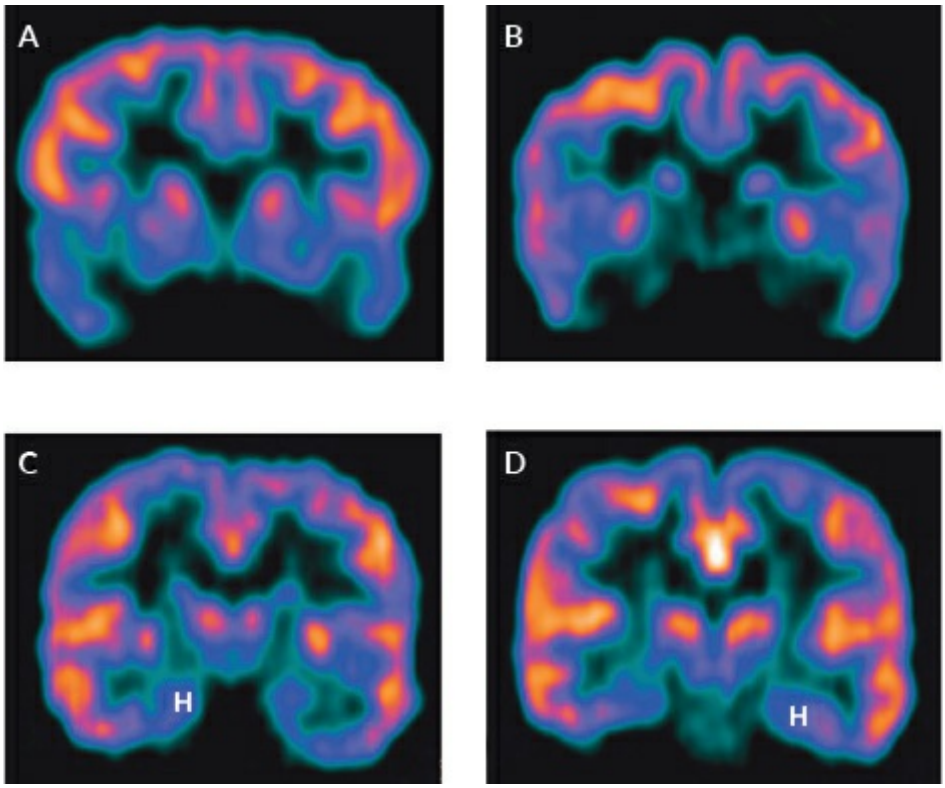


Figura 4.32. IRM en T2 (T2–FLAIR) de corte transversal que muestra hiperintensidad en los hipocampos (H) y los complejos amigdalinos (CA).

Caso 2

Seis meses antes de ser examinado en un servicio hospitalario, un paciente de 21 años presentó cuadro clínico de encefalitis viral por herpes. El paciente es llevado a la clínica por marcada pérdida de la memoria. Se realizó tomografía por emisión de positrones (PET, por su sigla en inglés) del cerebro (figura 4.33).



Figuras 4.33A y B. PET de vistas coronales del paciente en las que se observa ausencia de metabolismo en las caras inferiores de los lóbulos temporales e hipocampos.
Figuras 4.33C y D. PET de vistas coronales de un sujeto normal en las que se aprecia metabolismo en las caras inferiores de los lóbulos temporales e hipocampos (H).

REFERENCIAS

1. Nolte J. The human brain: an introduction to its functional anatomy. 6.ª ed. St. Louis: Mosby/Elsevier; 2009.
2. Erickson KI, Raji CA, Lopez OL, Becker JT, Rosano C, Newman AB, et al. Physical activity predicts gray matter volumen in late adulthood: the Cardiovascular Health Study. Neurology. 2010;75(16):1415–22.
3. Weaver L. Carbon monoxide poisoning. N Eng J Med. 2009;360:1217–25.
4. Wandell B. Clarifying human white matter. Annu Rev Neurosci. 2016;39:103–28.
5. Lancaster E, Martínez–Hernández E, Dalmau J. Encephalitis and antibodies to synaptic and neuronal cell surface proteins. Neurology. 2011;77(2):179–89.

LECTURAS RECOMENDADAS

1. Siegel A, Sapru H. Essential neuroscience. 2.ª ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2009.

2. Benowitz N. Nicotine addiction. N Eng J Med. 2010;362:2295–303.
3. Craig AD. How do you feel – now? The anterior insula and human awareness. Nature Reviews Neuroscience. 2009;10:59–70.

CAPÍTULO 5

TRONCO CEREBRAL

El tronco cerebral se localiza delante del cerebelo, detrás de la lámina basilar del hueso occipital y debajo de los hemisferios cerebrales. Se extiende en dirección caudal hasta continuarse en el cordón espinal a nivel del agujero magno. El tronco cerebral se divide en tres regiones que, de arriba abajo, son: el mesencéfalo, el puente o protuberancia y la médula oblongada, también conocida como bulbo raquídeo o medula. Entre el puente, la médula y el cerebelo, se encuentra el cuarto ventrículo. El tronco cerebral juega un papel importante en la función de algunos pares craneanos y es atravesado por numerosos fascículos que conectan diferentes partes del encéfalo y del cordón espinal. Las tres porciones del tronco cerebral se unen al cerebelo mediante tres pares de pedúnculos cerebelosos: superior, medio e inferior.

CONFIGURACIÓN SUPERFICIAL

Para describir la superficie del tronco cerebral se usará la figura 5.1A. En la parte superior del tronco se encuentra el mesencéfalo, que en esta vista corresponde a los pedúnculos cerebrales. Entre estos, está el espacio interpeduncular, por donde emergen los dos terceros pares craneanos o nervios oculomotores. El espacio interpeduncular contiene un tejido nervioso atravesado por ramas arteriales que se denomina sustancia perforada posterior. Delante del espacio interpeduncular, se aprecian los tubérculos mamilares, que hacen parte del hipotálamo. El puente se sitúa debajo del mesencéfalo y está separado de este por el surco póntico superior. Más abajo aparece la médula o bulbo raquídeo, cuyo límite con el puente es el surco póntico inferior o surco bulboprotuberancial. En la porción lateral del surco póntico inferior, a través de un espacio conocido como ángulo pontocerebeloso, emergen los pares craneanos VII (nervio facial) y VIII (nervio vestibulococlear o estatoacústico). En la región lateral del puente, a nivel del pedúnculo cerebeloso medio, se aprecia el nervio trigémino o quinto par craneano.

La figura 5.1B ofrece una mejor vista del ángulo pontocerebeloso y los pares craneanos VII y VIII. Hacia la línea media del surco póntico inferior se aprecia la emergencia de los pares craneanos VI (nervios abducens o motores oculares externos). Sobre la línea media del puente se localiza el surco basilar, por donde transcurre la arteria basilar, cuya porción superior se divide en dos ramas: las arterias cerebelosas superiores (abajo) y las arterias

cerebrales posteriores (arriba). Entre las dos arterias emergen los pares craneanos iii.

La figura 5.2A corresponde a un corte sagital del encéfalo. Se observa que la médula se prolonga hacia abajo en el cordón espinal. En su porción superior, se puede distinguir una pequeña escotadura: el surco póntico inferior. El puente o protuberancia es la porción más voluminosa del tronco cerebral y se localiza entre la médula (abajo) y el mesencéfalo (arriba). Está delimitado por los surcos pónticos inferior y superior, que en este corte asemejan pequeñas escotaduras en la parte inferior y superior del puente. En el mesencéfalo, se observa el acueducto cerebral, cuyo techo o tectum es la lámina colicular formada por los colículos superiores e inferiores de la cara posterior del mesencéfalo. Delante del acueducto cerebral, se encuentra el tegmento (piso) del mesencéfalo, que hace parte del pedúnculo cerebral. Encima de los colículos superiores se ubica la glándula pineal. Detrás del tronco cerebral se localiza el cerebelo, que se une al tronco cerebral a través de tres pares de pedúnculos:

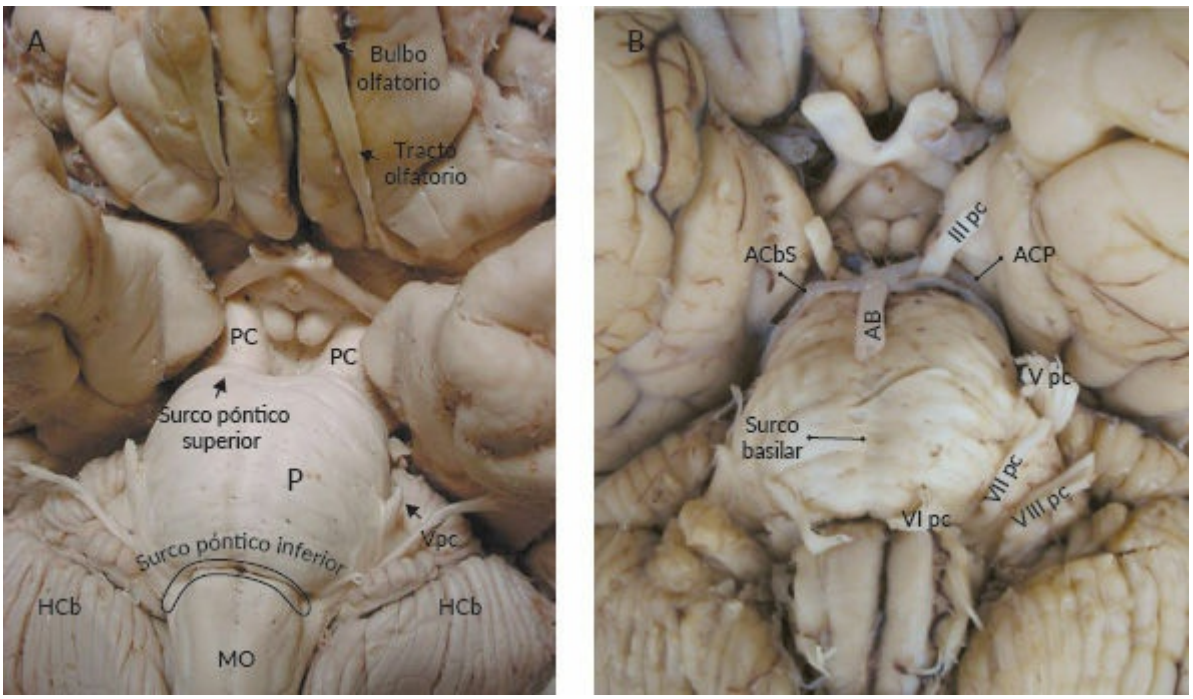


Figura 5.1A. Pieza anatómica con vista anterior de las tres porciones del tronco cerebral. PC: pedúnculo cerebral; P: puente; V pc: nervio trigémino; HCb: hemisferios cerebelosos; MO: médula oblongada.

Figura 5.1B. Pieza anatómica con vista anterior del tronco cerebral. III pc: nervio oculomotor; V pc: nervio trigémino; VI pc: nervio abducens; VII pc: nervio facial; VIII pc: nervio estatoacústico o vestibulococlear; ACP: arteria cerebral posterior; ACbS: arteria cerebelosa superior; AB: arteria basilar.

Pedúnculos cerebelosos superiores: o brazos conjuntivos, unen el mesencéfalo y el cerebelo, del cual contienen la mayoría de fibras eferentes. Entre ambos pedúnculos se encuentra el velo medular superior,

que forma el techo del cuarto ventrículo.

Pedúnculos cerebelosos medios: o brazos pónticos, nacen en la región lateral del puente y penetran en el cerebelo. Son los más voluminosos de los tres pares de pedúnculos. Sus fibras unen vías que provienen de la corteza cerebral con la corteza cerebelosa.

Pedúnculos cerebelosos inferiores: o cuerpos restiformes, se extienden desde la región dorsolateral de la médula hacia el cerebelo. Sus fibras provienen del cordón espinal y de la región inferior del tronco cerebral y terminan en el cerebelo.

Entre el puente, la médula y el cerebelo se encuentra el cuarto ventrículo. Del cerebelo se desprende el velo medular superior, que se fija en cada uno de los pedúnculos cerebelosos superiores y se dirige hacia los colículos inferiores para formar la porción superior del techo del cuarto ventrículo. El piso del cuarto ventrículo está formado por la cara posterior del puente y de la médula. En la figura 5.2A se observa la continuidad entre el acueducto cerebral y el cuarto ventrículo. También se aprecia el velo medular superior entre el cerebelo y el borde inferior del colículo inferior. Estas mismas estructuras se pueden observar en la IRM en secuencia T1 (T1–WI) de la figura 5.2B.

La figura 5.3A corresponde a un esquema de la cara posterior del tronco cerebral, en la que se ha retirado el cerebelo y, para ello, se han seccionado los pedúnculos cerebelosos. Esto permite visualizar el piso del cuarto ventrículo que, como ya se mencionó, corresponde a la cara posterior del puente y de la médula. El piso del cuarto ventrículo tiene forma de rombo. Su vértice superior se prolonga en el acueducto cerebral, el vértice inferior (obex) continúa en el conducto del epéndimo —que en el adulto se encuentra obliterado—, y los vértices laterales (recesos laterales) forman los agujeros laterales o de Luschka, que comunican el cuarto ventrículo con el espacio subaracnoideo. Las estrías medulares o auditivas dividen este rombo en dos triángulos: el superior, que corresponde a la cara posterior del puente, y el inferior, que corresponde a la cara posterior de la médula. En la línea media del piso del cuarto ventrículo se aprecia el surco medial posterior, que es la prolongación del surco espinal posterior del cordón espinal. A continuación, se describirá en detalle cada uno de los componentes externos e internos del tronco cerebral. Conocer estas estructuras y su función es fundamental para entender los síndromes neurológicos causados por lesiones en esta región.

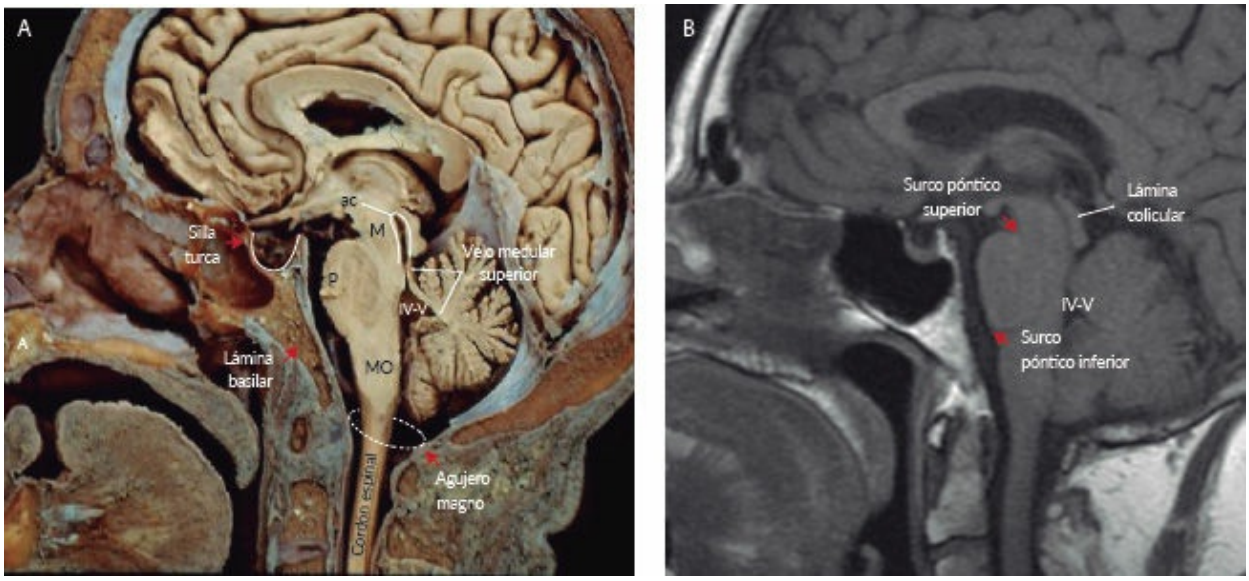


Figura 5.2A. Corte sagital anatómico de la cabeza en el que se observan las relaciones del cráneo y el tronco cerebral. M: mesencéfalo; P: puente; MO: médula oblongada; ac: acueducto cerebral; IV–V: cuarto ventrículo.

Figura 5.2B. IRM en T1 (T1–WI) en la que se identifican las estructuras de la figura anterior. IV–V: cuarto ventrículo.

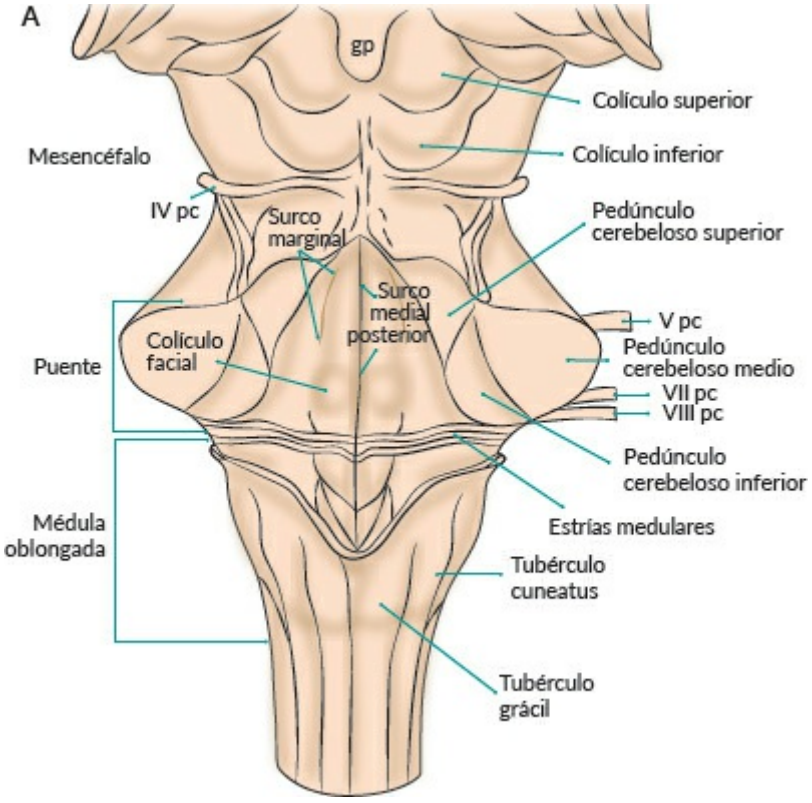


Figura 5.3A. Esquema de la cara posterior del tronco cerebral. gp: glándula pineal; IV pc: nervio troclear; V pc: nervio trigémino; VII pc: nervio facial; VIII pc: nervio vestibulococlear o estatoacústico.

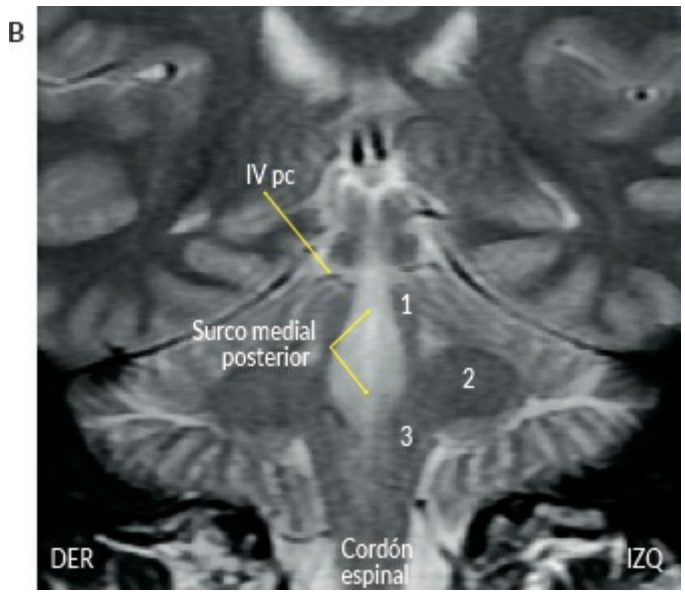


Figura 5.3B. IRM en T2 (T2–WI) del piso del cuarto ventrículo con sus cuatro vértices. 1: pedúnculos cerebelosos superiores; 2: medios; 3: inferiores.

MESENCÉFALO

En la cara anterior del mesencéfalo (figura 5.4A) se encuentran los dos pedúnculos cerebrales que se unen a la base de cada hemisferio cerebral. Los pedúnculos cerebrales contienen múltiples fascículos de fibras nerviosas que provienen de la corteza cerebral y terminan en el tronco cerebral y el cordón espinal. Entre los pedúnculos cerebrales se localiza la fosa interpeduncular, que contiene la sustancia perforada posterior. Por la fosa interpeduncular emergen los dos terceros pares craneanos, que se dirigen hacia la cavidad orbitaria y terminan inervando los músculos recto interno, recto superior, recto inferior, oblicuo inferior y elevador del párpado del ojo ipsolateral. El nervio oculomotor contiene, además, fibras viscerales que inervan el músculo constrictor del iris y el músculo ciliar.

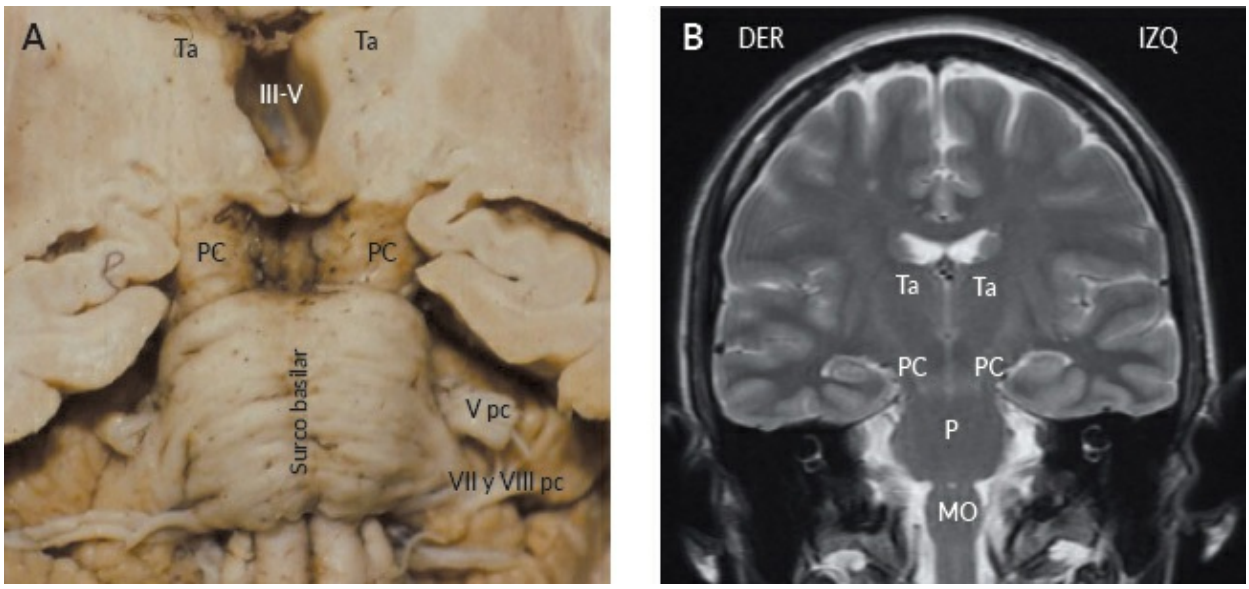


Figura 5.4A. Corte coronal anatómico del encéfalo en el que se aprecian los pedúnculos cerebrales y la fosa interpeduncular. PC: pedúnculo cerebral; III–V: tercer ventrículo; V pc: quinto par craneano; VII y VIII pc: séptimo y octavo pares craneanos; Ta: tálamo.

Figura 5.4B. IRM en T2 (T2–WI) en la que se aprecian las mismas estructuras de la figura anterior. P: puente; MO: médula oblongada; PC: pedúnculo cerebral; Ta: tálamo.

Para observar la cara posterior del mesencéfalo (figura 5.5A), es necesario levantar los hemisferios cerebrales y declinar el cerebelo. En esta cara se encuentra la lámina colicular, constituida por los colículos superiores e inferiores. La glándula pineal se halla encima de los colículos superiores. Los colículos se unen con el metatálamo (cuerpos geniculados laterales y mediales) mediante los brazos conjuntivos coliculares. Los brazos conjuntivos coliculares superiores unen los colículos superiores con los cuerpos geniculados laterales y los brazos conjuntivos coliculares inferiores conectan los colículos inferiores con los cuerpos geniculados mediales. Debajo de los colículos inferiores están los pedúnculos cerebelosos superiores que terminan en la cara lateral del mesencéfalo. Entre estos, se sitúa el velo medular superior.

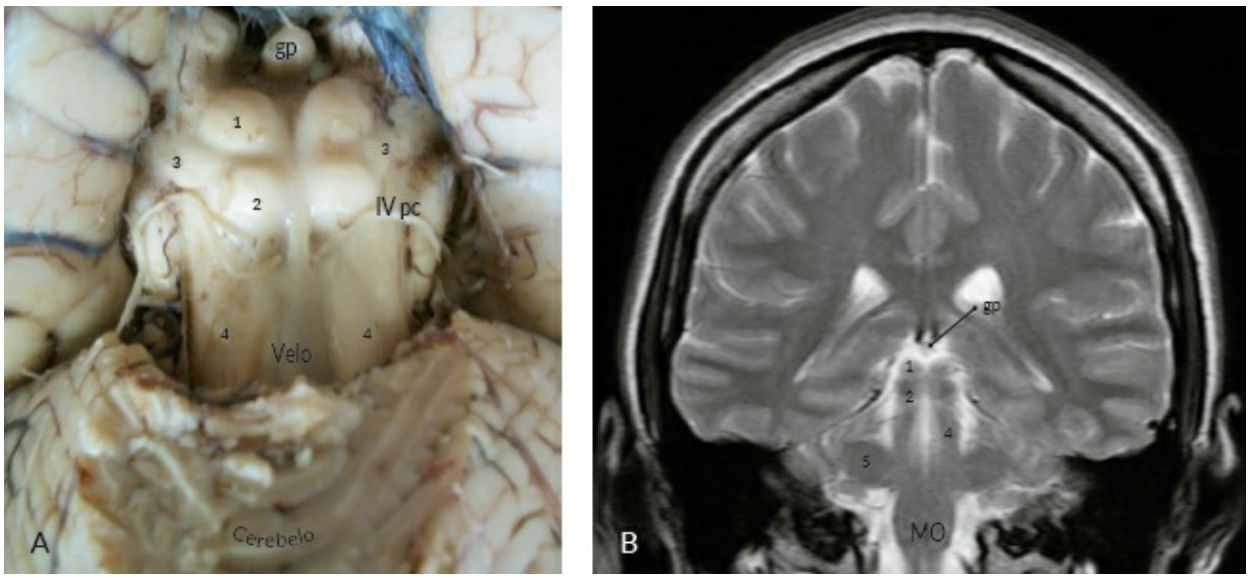


Figura 5.5A. Vista anatómica de la cara posterior del mesencéfalo. 1: colículo superior; 2: colículo inferior; 3: brazo conjuntivo colicular inferior; 4: pedúnculo cerebeloso superior; gp: glándula pineal; IV pc: cuarto par craneano.

Figura 5.5B. IRM en T2 (T2–WI) con vista similar a la de la figura anterior. 1: colículo superior; 2: colículo inferior; 4: pedúnculo cerebeloso superior; 5: pedúnculo cerebeloso medio; gp: glándula pineal; MO: médula oblongada.

Las capas superficiales de los colículos superiores reciben información visual que proviene del tracto óptico y de la corteza occipital. Además, reciben información auditiva. Con base en la información recibida, las capas profundas de los colículos superiores controlan los mecanismos motores responsables de los movimientos sacádicos (movimientos oculares rápidos) y la orientación de la mirada hacia el estímulo. De igual manera, se proyectan fibras a la porción cervical del cordón espinal a través del tracto tectoespinal, que juega un papel importante en los movimientos reflejos de la cabeza y el cuello. Los colículos inferiores son estructuras nucleares complejas que cumplen una función importante de relevo en la vía auditiva. Mediante un fascículo denominado lemnisco lateral, reciben información que proviene de los núcleos cocleares localizados entre la médula y el puente. A su vez, proyectan sus axones a través del brazo conjuntivo colicular inferior hacia el cuerpo geniculado medial. Debajo de los colículos inferiores emerge el cuarto par craneano (nervio troclear), que rodea el mesencéfalo y se dirige hacia la cavidad orbitaria para inervar el músculo oblicuo superior o troclear.

Para analizar las estructuras interiores del mesencéfalo se debe realizar un corte transversal a nivel de los colículos superiores (figura 5.6). La sección más dorsal (el tectum) corresponde a los colículos superiores y la porción más ventral, a los pedúnculos cerebrales, que están formados por múltiples fascículos provenientes del cerebro. Los pedúnculos cerebrales limitan atrás con la sustancia negra, que los separa de la parte central del mesencéfalo denominada tegmento. El acueducto cerebral, que está rodeado por la sustancia gris periacueductual (SGP), separa el tegmento del tectum (figuras

5.6A y B). De manera que el tegmento es la porción central del mesencéfalo entre el acueducto cerebral y la sustancia negra. Como se describió antes, el acueducto cerebral hace parte del sistema ventricular y sirve como conducto para el flujo del lcr del tercer ventrículo hacia el cuarto ventrículo. Algunos autores dividen el mesencéfalo en dos partes: el tectum y los pedúnculos cerebrales, tomando estos y el tegmento como una misma porción.

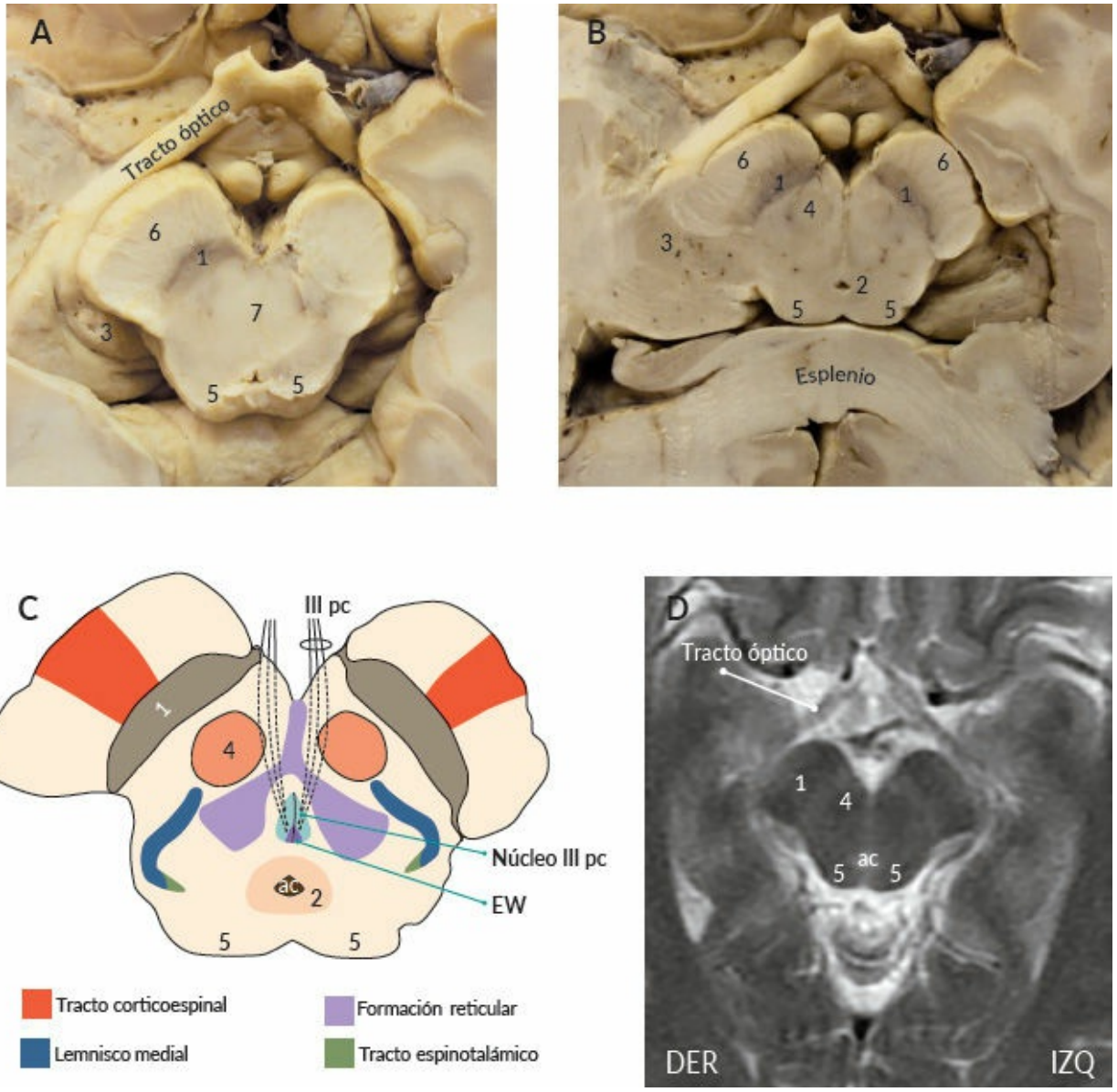


Figura 5.6A. Corte transversal anatómico del mesencéfalo a la altura de los colículos superiores. 1: sustancia negra; 3: cuerpo geniculado lateral; 5: colículo superior; 6: pedúnculo cerebral; 7: tegmento.

Figura 5.6B. Corte transversal anatómico del cuerpo geniculado lateral. 1: sustancia negra; 2: sustancia gris periacueductual; 3: cuerpo geniculado lateral; 4: núcleo rojo; 5: colículo superior; 6: pedúnculo cerebral.

Figura 5.6C. Esquema de corte transversal del mesencéfalo. III pc: tercer par craneano; EW: núcleo de Edinger–Westphal; ac: acueducto cerebral. 1: sustancia negra; 2: sustancia gris periacueductual; 4: núcleo rojo; 5: colículo superior.

Figura 5.6D. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal del mesencéfalo. 1: sustancia negra; 4: núcleo rojo; 5: colículo superior; ac: acueducto cerebral.

Sustancia negra

En el tallo cerebral existen dos grandes grupos nucleares que contienen neuronas pigmentadas con neuromelanina: la sustancia negra y el locus coeruleus. Aunque las neuronas de ambos grupos presentan neuromelanina, tienen muy poco en común. El locus coeruleus está constituido por neuronas noradrenérgicas en su mayoría, mientras que la sustancia negra tiene una población neuronal más diversa que incluye el grupo más grande de neuronas dopaminérgicas del encéfalo. En el recién nacido, ninguno de los grupos nucleares contiene neuronas pigmentadas; el pigmento aparece en las neuronas a medida que el individuo crece y se hace más visible hacia los 15 años de edad.

La sustancia negra contiene dos grupos neuronales: uno localizado en la sección medial que se conoce como pars compacta y otro localizado en la porción ventrolateral y de apariencia reticulada que se denomina pars reticulata. Cada grupo cumple una función diferente. Las neuronas de la pars compacta liberan dopamina en la región del neoestriado. En contraste, las neuronas de la pars reticulata se proyectan al tálamo y expresan gaba (ácido gamma–aminobutírico). A su vez, fibras que provienen del neoestriado se proyectan a la porción reticular de la sustancia negra. Se sabe que la pérdida de neuronas en la pars compacta desencadena un trastorno motor conocido como enfermedad de Parkinson.

Núcleos rojos

Los núcleos rojos se encuentran en la mitad superior del mesencéfalo y se extienden hacia el diencéfalo. Desempeñan un rol importante en la actividad motora. Reciben fibras que provienen de las áreas motoras y premotoras del hemisferio cerebral ipsolateral —que presentan una organización somatotópica— y del núcleo dentado del cerebelo contralateral. Contienen dos tipos de neuronas: las parvocelulares —que son más abundantes— y las magnocelulares. Las neuronas parvocelulares envían proyecciones al núcleo olivar inferior para influir sobre la actividad motora del cerebelo. Las neuronas magnocelulares se proyectan al cordón espinal (haz rubroespinal), principalmente a la región cervical, para facilitar la actividad de las neuronas motoras flexoras.

En los vertebrados inferiores, los núcleos rojos están formados en su mayoría por neuronas magnocelulares y cumplen una función importante en el control del movimiento de las extremidades. Con el desarrollo del telencéfalo y el neocerebelo en los primates, los núcleos rojos se reorganizan. En los humanos, las neuronas parvocelulares se expanden debido a las proyecciones que provienen del núcleo dentado del cerebelo y de los

hemisferios cerebrales, y las neuronas magnocelulares disminuyen de manera considerable.

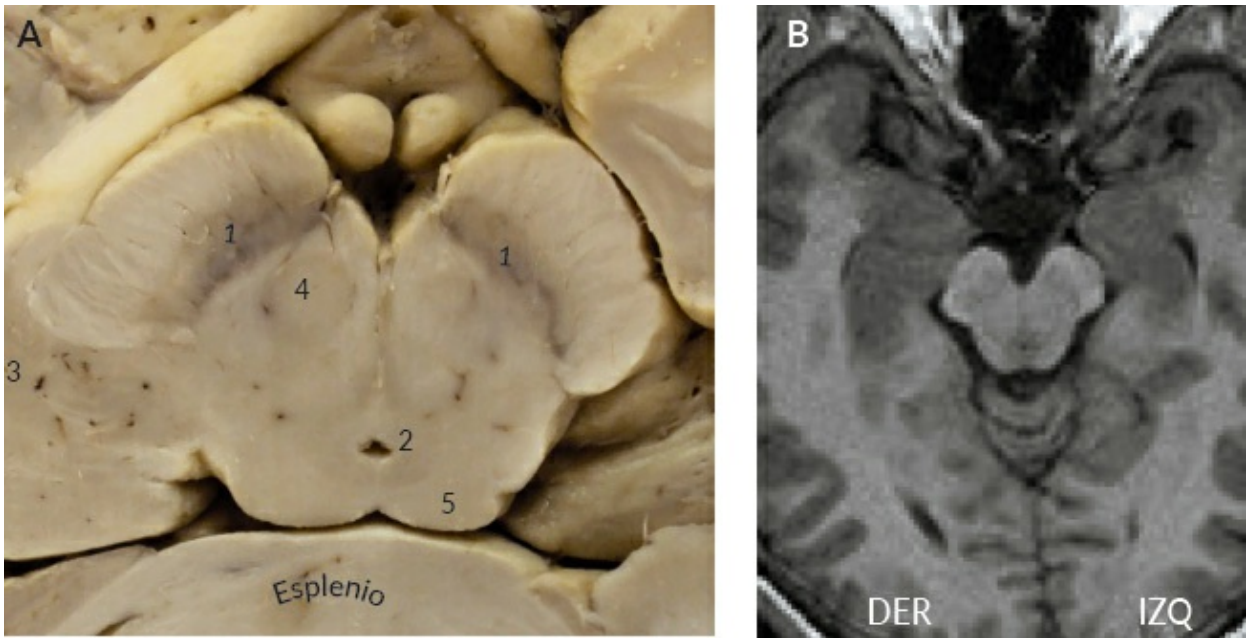


Figura 5.7A. Ampliación de un corte transversal anatómico del mesencéfalo. 1: sustancia negra; 2: sustancia gris periacueductual; 3: cuerpo geniculado lateral; 4: núcleo rojo; 5: colículo superior.
Figura 5.7B. IRM en T1 (T1–WI) con algunas estructuras de la figura anterior.

Sustancia gris periacueductual

La sustancia gris periacueductual (SGP) se localiza entre la parte superior del mesencéfalo y los colículos superiores. Para ser precisos, la SGP no rodea completamente el acueducto cerebral, pues la porción anterior no se considera parte de la SGP al estar ocupada por núcleos bien diferenciados como los núcleos del tercer par craneano, los de Edinger–Westphal y los del cuarto par craneano. No es una estructura homogénea. Aunque su citoarquitectura engañosa impide una división en regiones precisas, gracias a su organización neuroquímica (quimioarquitectura) es posible dividirla en cuatro columnas: dorsomedial, dorsolateral, lateral y ventrolateral. Estas columnas, que se conservan en todos los mamíferos, organizan las conexiones aferentes y eferentes de la SGP (figura 5.8).

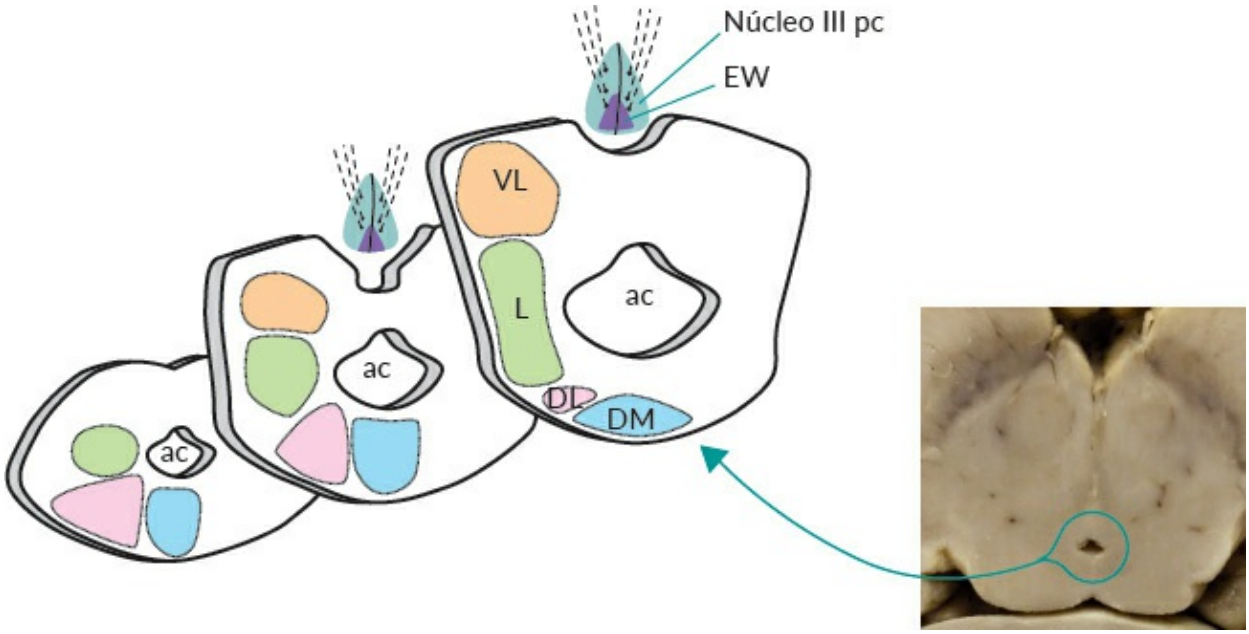


Figura 5.8. Esquema de varios cortes transversales de la sustancia gris periacueductual con las columnas propuestas por Olzewski y Baxter. Núcleo III pc: núcleo del tercer par craneano; EW: núcleo de Edinger–Westphal; DM: dorsomedial; DL: dorsolateral; L: lateral; VL: ventrolateral; ac: acueducto cerebral.

Columna lateral: recibe aferencias nociceptivas de la piel y su estimulación produce aumento en la actividad motora y analgésica. En los humanos, la estimulación de la columna lateral se ha asociado a sensaciones de miedo, ansiedad y agitación.

Columna ventrolateral: recibe información nociceptiva de estructuras profundas y del núcleo solitario (localizado en la médula oblongada). El estímulo de algunas partes de esta columna se ha asociado con hipotensión, bradicardia e hiporreactividad. Las columnas lateral y ventrolateral tienen conexiones similares pero efectos opuestos en la presión arterial, en la frecuencia cardiaca y en la forma de respuesta defensiva. La lateral coordina la defensa activa, mientras que la ventrolateral, la defensa pasiva.

Columna dorsomedial: comparte con las columnas laterales (lateral y ventrolateral) características químicas y conexiones similares, aunque al parecer contiene una densidad menor de fibras serotoninérgicas. Estas tres columnas se proyectan a la parte inferior del tronco cerebral.

Columna dorsolateral: difiere de las otras columnas en sus características químicas y en sus conexiones. Está relacionada con las capas profundas e intermedias de los colículos superiores y, aunque recibe un influjo importante de la corteza prefrontal, no parece recibir información sensitiva.

La SGP desempeña un rol importante en las respuestas somáticas y autonómicas de supresión del dolor (nociceptiva) y de los tres grupos de

opioides: encefalinas (más abundantes), dinorfinas y endorfinas. La SGP integra información que proviene del sistema límbico con impulsos nociceptivos que provienen del cordón espinal. Recibe información selectiva del complejo amigdalino, el hipotálamo y el locus coeruleus. Con base en estas conexiones, la SGP constituye la intersección entre el sistema sensitivo ascendente, que lleva información nociceptiva, y el sistema límbico descendente, relacionado con las respuestas emocionales.

Delante de la SGP, a nivel de los colículos superiores, se localizan los núcleos del tercer par craneano. Las fibras que nacen en estos núcleos (derecho e izquierdo) se dirigen hacia delante y forman varios fascículos que convergen para formar el nervio oculomotor en el espacio interpeduncular (figura 5.6C). El núcleo del par iii está compuesto por varias columnas de neuronas o subnúcleos que inervan músculos específicos. Las columnas que suplen el recto medio, oblicuo inferior y recto inferior se proyectan al ojo del mismo lado. De una sola columna que se localiza en la línea media se originan las fibras para los músculos elevadores de los párpados. La columna que inerva el músculo recto superior se proyecta al ojo contralateral. Finalmente, una columna (derecha e izquierda) conocida como núcleo de Edinger–Westphal contiene neuronas viscerales, preganglionares y parasimpáticas, se localiza en la línea media y proyecta fibras que acompañan al nervio oculomotor ipsolateral y terminan en el ganglio ciliar a nivel de la cavidad orbitaria. Esta, a su vez, desarrolla fibras que terminan inervando el iris y el músculo ciliar. Una vez emerge del tallo cerebral, el tercer par craneano inerva únicamente los músculos ipsolaterales (del mismo lado), de tal forma que una lesión en el tercer par afectaría solamente un ojo.

Un corte transversal a nivel de los colículos inferiores (figura 5.9) permite visualizar el núcleo del par craneano iv, justo debajo y delante de la SGP. De este núcleo se desprenden axones que pasan por detrás del acueducto cerebral, se dirigen al lado opuesto, salen por debajo del colículo inferior contralateral, rodean el mesencéfalo, se proyectan hacia la cavidad orbitaria y terminan inervando el músculo troclear, que dirige la mirada hacia abajo y hacia la línea media. En la práctica clínica, cuando se lesiona el par iv de un lado, se señala el lado del músculo afectado, no el lado del origen del nervio troclear. Delante de la SGP también se encuentra el núcleo mesencefálico del nervio trigémino (par craneano v), que recibe información propioceptiva (sentido de posición) de los músculos masticadores ipsolaterales.

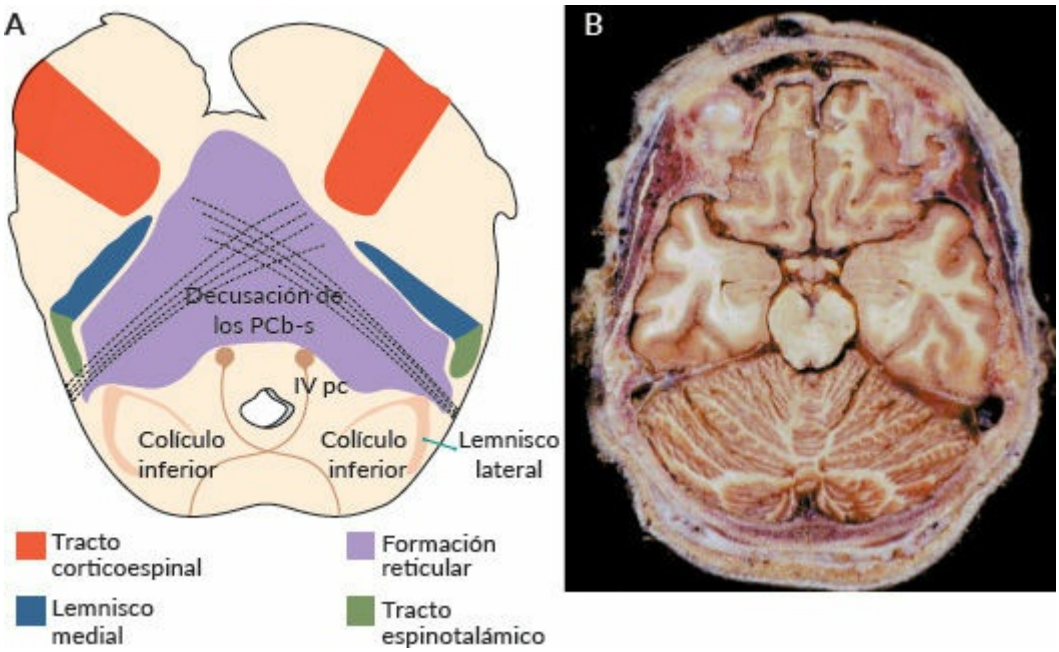


Figura 5.9A. Esquema de un corte transversal a nivel de los colículos inferiores. PCb–s: pedúnculos cerebelosos superiores; IV pc: cuarto par craneano.
Figura 5.9B. Corte transversal anatómico a nivel de los colículos inferiores.

En este corte, los núcleos rojos son reemplazados por la decusación (entrecruzamiento) de los pedúnculos cerebelosos superiores. Estos pedúnculos nacen en el núcleo dentado e interpuesto, penetran en la parte superior del puente, ascienden hacia el mesencéfalo, se cruzan a nivel de los colículos inferiores y terminan en el núcleo rojo y el tálamo del lado opuesto. Los pedúnculos cerebelosos superiores contienen la mayor parte de las fibras eferentes del cerebelo.

Fascículos del mesencéfalo

A continuación, se describen algunos fascículos que atraviesan el mesencéfalo y, en general, el tronco cerebral. En el pedúnculo cerebral, se encuentra el tracto corticoespinal o vía piramidal, que está constituido por miles de fibras motoras que se originan en la corteza del hemisferio cerebral del mismo lado (giros precentral, postcentral y paracentral) y, como su nombre lo indica, se dirigen hacia el cordón espinal.

Detrás de la sustancia negra y lateral al núcleo rojo se encuentran dos fascículos ascendentes: el más medial se llama lemnisco medial y el más lateral, tracto espinotalámico ventrolateral. Las neuronas de los fascículos grácil y cuneatus del cordón espinal terminan en los tubérculos grácil y cuneatus en la cara posterior de la médula. A partir de estos núcleos, se originan fibras que se cruzan y forman el lemnisco medial, que asciende por el tronco cerebral hasta alcanzar el tálamo. Este fascículo lleva información de tacto profundo o sentido de posición (propiocepción) de las extremidades

del hemicuerpo contralateral. El haz o tracto espinotalámico ventrolateral se origina en las astas posteriores del cordón espinal; luego, se decusa y asciende por los cordones espinales ventral y lateral del lado opuesto hasta terminar en el tálamo. Este fascículo lleva información de dolor y temperatura.

En el área central del tegmento se encuentra la formación reticular, que es una red neuronal extendida a lo largo del tronco cerebral. Está constituida por agrupaciones nucleares interconectadas mediante fibras nerviosas que cumplen diversas funciones. Delante de la SGP se encuentra el fascículo longitudinal medio, que también transcurre por todo el tronco cerebral. Contiene fibras ascendentes y descendentes. Las ascendentes se originan en los núcleos vestibulares del puente y se proyectan hacia el puente y el mesencéfalo. Estas fibras proveen información sobre la posición de la cabeza e intervienen en el control de los movimientos oculares conjugados. Las fibras descendentes se originan en los núcleos vestibulares, los núcleos reticulares y los colículos superiores (fibras tectoespinales) y se dirigen hacia el cordón espinal cervical. Controlan los mecanismos para ajustar cambios en la posición de la cabeza como respuesta a estímulos vestibulares.

Ejercicios clínicos

Caso 1

Al despertar en la mañana, una paciente de 67 años con antecedentes de diabetes tipo ii y dislipidemia presenta déficit neurológico. Es trasladada al servicio de urgencias y, dados los hallazgos del examen físico, se solicita IRM cerebral (figura 5.10). Antes de leer los hallazgos de las IRM, responda: ¿cuál es la anormalidad?, ¿cuál será el hallazgo del examen neurológico?

Caso 2

La figura 5.11 corresponde a una IRM en secuencia FLAIR a nivel de los colículos superiores. ¿Qué hallazgo observa en esta imagen?, ¿qué síntomas neurológicos se derivan de esta lesión?

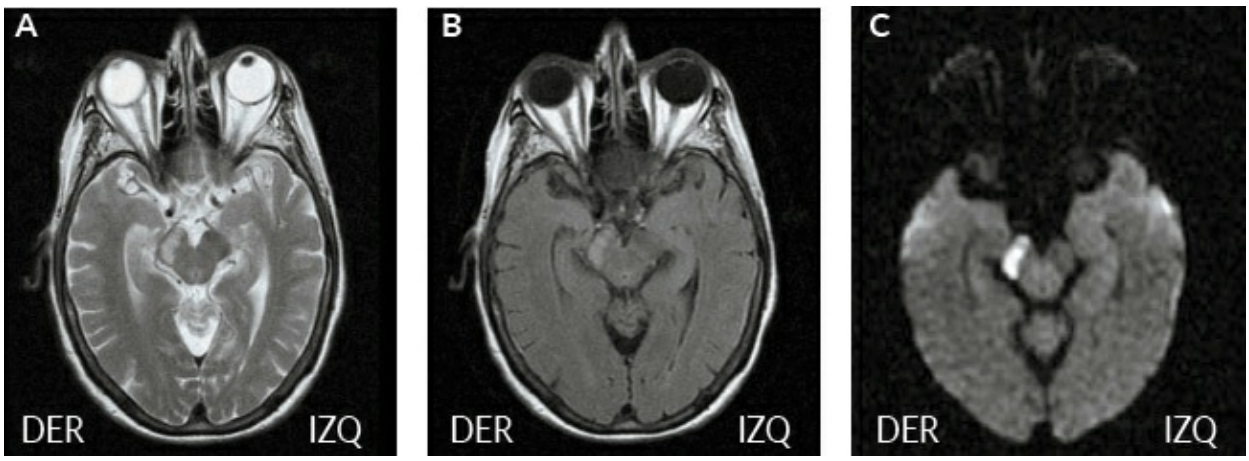


Figura 5.10A. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal a nivel de los colículos superiores en la que se observa lesión en el pie del pedúnculo derecho, delante de la sustancia negra.

Figura 5.10B. IRM en FLAIR que muestra la misma lesión de la imagen anterior.

Figura 5.10C. IRM en difusión que muestra una lesión en la parte anterior del pedúnculo sugestiva de infarto agudo. La imagen señala que el fascículo afectado es el haz corticoespinal, lo que desencadena pérdida o disminución del movimiento (hemiplejía o hemiparesia) del hemicuerpo izquierdo.

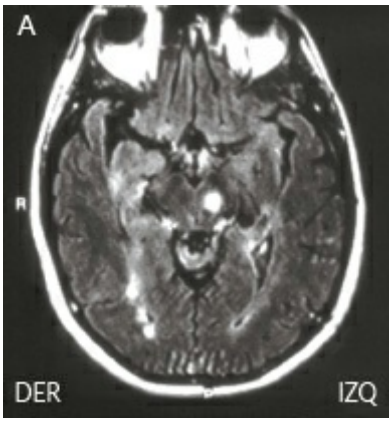


Figura 5.11. IRM en FLAIR que muestra lesión en el núcleo rojo del lado izquierdo, detrás de la sustancia negra.

PUENTE O PROTUBERANCIA

El puente sirve de conexión entre la médula oblongada o bulbo raquídeo (abajo) y el mesencéfalo (arriba). Para su descripción anatómica, debe observarse la cara anterior y la cara posterior. En la línea media de la cara anterior del puente se sitúa el surco basilar, y a sus costados se encuentran los rodetes. En la parte posterior de los rodetes, se observa el quinto par craneano o nervio trigémino (figura 5.12). Este par craneano está formado por tres nervios —el nervio oftálmico (V1), el nervio maxilar (V2) y el nervio mandibular (V3)— que convergen a nivel del ganglio del trigémino y se extienden hacia el puente como un solo nervio. El nervio trigémino provee información de dolor, tacto superficial y propiocepción de la hemicara

ipsolateral. Al ingresar al tronco cerebral, sus fibras terminan, según su función, en cada uno de los núcleos del trigémino localizados en el mesencéfalo, el puente (núcleo principal), la médula oblongada y el cordón espinal (núcleo o tracto espinal del trigémino). Los rodetes se prolongan hacia atrás y forman los pedúnculos cerebelosos medios, que penetran en el cerebelo. Los pedúnculos cerebelosos medios (brazos pónticos) se relacionan directamente con el puente, mientras que los pedúnculos cerebelosos superiores lo atraviesan en su porción rostral para terminar en el mesencéfalo. Los surcos pónticos superior e inferior marcan los límites del puente con el mesencéfalo y con la médula, respectivamente.

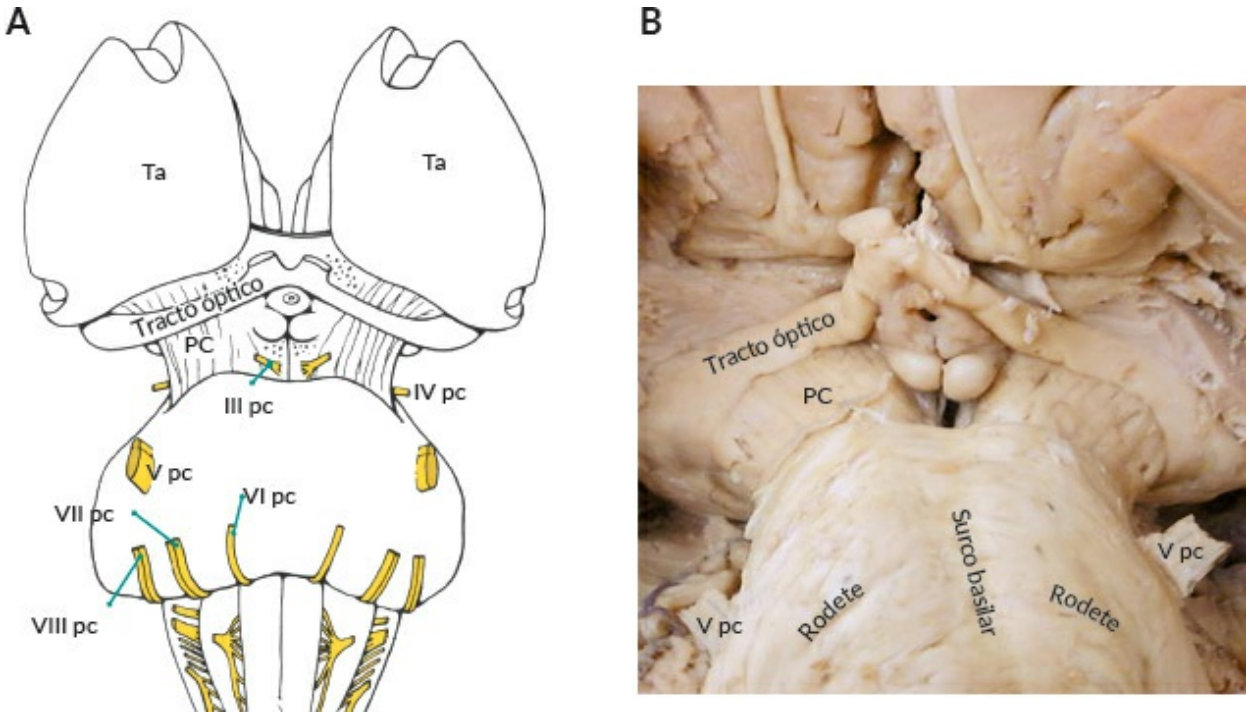


Figura 5.12A. Esquema de vista anterior del tronco cerebral. Ta: tálamo; PC: pedúnculo cerebral; III pc: tercer par craneano; IV pc: cuarto par craneano; V pc: quinto par craneano; VI pc: sexto par craneano; VII pc: séptimo par craneano; VIII pc: octavo par craneano.

Figura 5.12B. Pieza anatómica en la que se aprecia el surco basilar del puente y la emergencia del nervio trigémino (V pc).

La cara posterior del puente corresponde al triángulo superior del piso del cuarto ventrículo. En esta cara se aprecia la eminencia media, delimitada por el surco marginal hacia fuera y por el surco medial posterior hacia dentro. Debajo de la eminencia media y en relación con las estrías medulares, se encuentra el colículo facial o eminencia teres, que es la prominencia producida por las fibras del par craneano VII que rodean el núcleo del par VI, a nivel del tegmento del puente (figura 5.3). En su configuración interior, el puente se divide en dos regiones: la más voluminosa es la porción ventral o región basal del puente, y la menos voluminosa, la porción dorsal o tegmento.

Región basal del puente

En esta región hay dos grupos de fibras. Uno está conformado por las fibras pónticas transversas o pontocerebelosas, que nacen de muchos núcleos distribuidos en toda la región basal y se extienden horizontalmente. Estas fibras se dirigen hacia atrás y forman los pedúnculos cerebelosos medios. Los núcleos pónticos de un hemipuente reciben fibras que provienen de la corteza cerebral ipsolateral y envían sus axones (fibras transversas) a la corteza cerebelosa contralateral, formando el pedúnculo cerebeloso contralateral

El otro grupo de fibras presenta una distribución vertical y corresponde a los fascículos corticoespinales y corticobulbares. Ambos grupos de fascículos son perpendiculares a las fibras pónticas transversas y se dirigen al cordón espinal y la médula oblongada, respectivamente. A nivel del puente, las fibras corticobulbares —llamadas también corticonucleares— se desprenden del fascículo y forman sinapsis con interneuronas de la formación reticular cerca de los núcleos de los pares craneanos motores y en los núcleos reticulares del puente (figura 5.14).

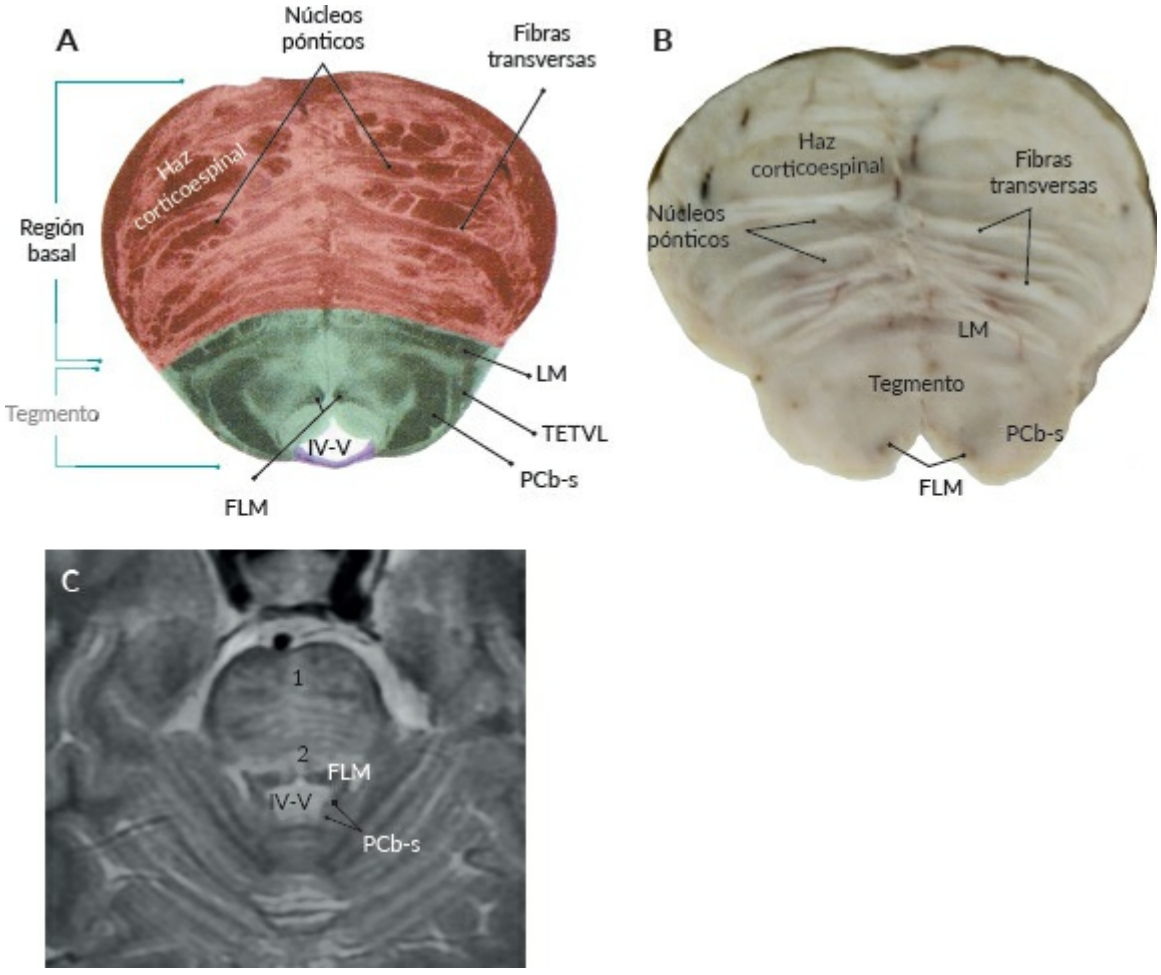


Figura 5.13A. Corte transversal anatómico de la porción superior del puente. LM: lemnisco medial; TETVL: tracto espino–talámico ventrolateral; PCb–s: pedúnculos cerebelosos superiores; FLM:

fascículo longitudinal medio; IV–V: cuarto ventrículo. **Fuente:** adaptada de (1).
Figura 5.13B. Corte horizontal anatómico similar al de la imagen anterior.
Figura 5.13C. IRM en T2 (T2–WI) del puente. 1: porción basal; 2: tegmento; PCb–s: pedúnculos cerebelosos superiores; FLM: fascículo longitudinal medio; IV–V: cuarto ventrículo.

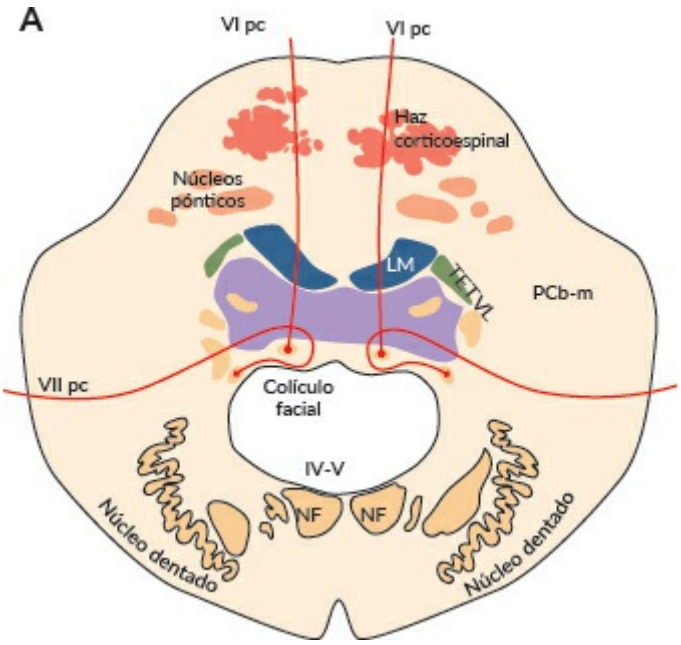


Figura 5.14A. Esquema de un corte transversal del puente a la altura de los pedúnculos cerebelosos medios. LM: lemnisco medial; TETVL: tracto espinotalámico ventrolateral; VI pc: sexto par craneano; VII pc: séptimo par craneano; IV–V: cuarto ventrículo; en violeta: formación reticular; PCb–m: pedúnculos cerebelosos medios NF: núcleo fastigial.

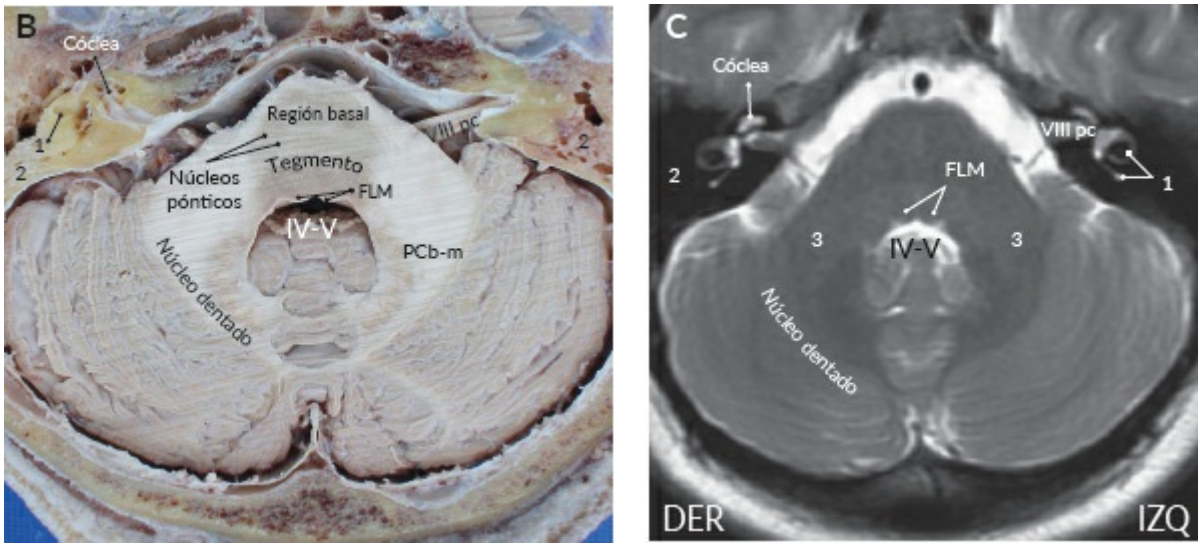


Figura 5.14B. Corte horizontal anatómico similar al de la figura anterior.
Figura 5.14C. IRM en T2 (T2–WI) de corte similar al de la imagen anterior. 1: canales semicirculares; 2: peñasco del temporal; 3: pedúnculos cerebelosos medios; VIII pc: octavo par craneano; IV–V: cuarto ventrículo; FLM: fascículo longitudinal medio.

Tegmento del puente

Similar al mesencéfalo, el tegmento del puente contiene diferentes grupos nucleares que pertenecen a algunos pares craneanos (V, VI, VII, VIII) y otros grupos no relacionados con estos que cumplen funciones sensitivas, motoras y autonómicas (figura 5.14). En la mitad superior del tegmento (porción dorsolateral), se encuentra el núcleo principal del quinto par craneano, que recibe información somatosensorial de la hemicara ipsolateral. En posición medial a este núcleo, se encuentra el núcleo motor del nervio trigémino, que proyecta sus axones a los músculos de la masticación de la hemicara ipsolateral.

En la mitad inferior del tegmento, cercano al piso del cuarto ventrículo, se encuentra el núcleo del sexto par craneano o nervio abducens (figura 5.14). Desde allí, este nervio se dirige hacia adelante, atraviesa la región basal, se relaciona con el tracto corticoespinal y abandona el puente a nivel del surco póntico inferior, a lado y lado del surco basilar, para dirigirse hacia la cavidad orbitaria e inervar el músculo abducens o recto externo. El núcleo motor del nervio facial (par craneano VII) se localiza en la porción ventrolateral del tegmento. Desde este núcleo, el nervio facial se dirige hacia atrás, rodea la línea medial del núcleo del par VI, forma el colículo facial, se dirige lateralmente para abandonar el puente a nivel del ángulo pontocerebeloso, se extiende al conducto auditivo interno y termina inervando los músculos de la mímica facial en la hemicara del mismo lado. En posición ventrolateral respecto al núcleo del par VI, se encuentra el núcleo salivatorio superior, que contiene fibras parasimpáticas que acompañan las fibras motoras del par VII y median la lacrimación y la salivación.

En la porción inferior del tegmento también se encuentran los núcleos vestibulares superior y lateral. De estos núcleos nacen fibras que contribuyen a formar los fascículos longitudinales medios y los tractos vestibuloespinales laterales. El fascículo longitudinal medio está formado por fibras ascendentes que terminan en los núcleos de los pares craneanos VI, IV y III, y fibras descendentes que terminan en el cordón espinal (figura 5.14). A través de las conexiones con los núcleos mencionados, las fibras ascendentes median los mecanismos para la mirada conjugada horizontal y vertical. Los tractos vestibuloespinales laterales se proyectan a todos los niveles del cordón espinal y juegan un papel importante en el mantenimiento de la postura al estimular las motoneuronas que inervan los músculos extensores, principalmente en las extremidades inferiores. En esta misma región, se localizan los núcleos olivares superiores, que se relacionan con la función auditiva.

La región ventral del tegmento es ocupada por el lemnisco medial, que demarca el límite entre el tegmento y la porción basal del puente. El haz espinotalámico ventrolateral se localiza lateral y ligeramente posterior al lemnisco medial. El haz trigeminotalámico, que media información sensitiva proveniente de la hemicara del lado opuesto, acompaña al haz

espinotalámico ventrolateral. El fascículo longitudinal medio mantiene su posición dorsomedial. Otros fascículos que no se aprecian fácilmente en los cortes transversales del puente y que se originan en el mesencéfalo son el tracto rubroespinal, que se sitúa justo detrás del lemnisco medial, y el tracto tectoespinal, que se localiza inmediatamente delante del fascículo longitudinal medio. A lo largo del tegmento también se encuentra parte de la formación reticular

En el tegmento del puente, cerca al piso del cuarto ventrículo, se ubica el locus coeruleus (del latín para «mancha azul»), un grupo de neuronas pigmentadas cuya apariencia azul oscura se debe a la neuromelanina que presentan. Proveen amplias proyecciones axonales con múltiples ramificaciones terminales que se dirigen a la corteza cerebral, el hipocampo, los núcleos basales, el tronco cerebral, el cordón espinal y el cerebelo. El locus coeruleus es el principal grupo neuronal del encéfalo que sintetiza noradrenalina. En los primates, las prolongaciones del locus coeruleus inervan densamente la corteza prefrontal, parietal y la región posterior del tálamo (región pulvinar). Se ha señalado que este grupo neuronal es clave en el sistema encargado de dirigir y controlar la atención.

La pérdida neuronal es una de las características patológicas del inicio temprano de la enfermedad de Parkinson y la demencia tipo Alzheimer. Recientemente se ha desarrollado un método para visualizar las células que contienen neuromelanina —como las del locus coeruleus— a través de imágenes rápidas de spin–echo (FSE, por su sigla en inglés) T1–WI (figura 5.15).

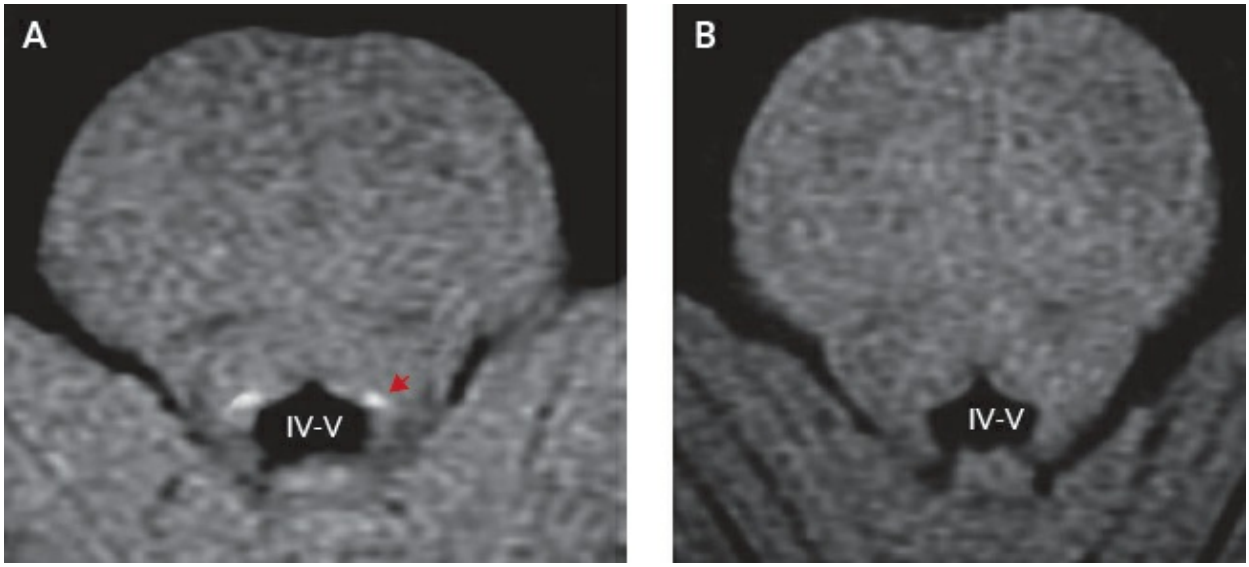


Figura 5.15A. IRM en T1 (T1–WI–FSE) de alta resolución de una persona sana en la que aparece el locus coeruleus (►) con señal de alta intensidad en la parte posterosuperior del tegmento del puente. IV–V: cuarto ventrículo. **Fuente:** adaptada de (2).

Figura 5.15B. IRM en T1 (T1–WI–FSE) de alta resolución de un paciente con enfermedad de Alzheimer en la que la señal del locus coeruleus está ausente. **Fuente:** adaptada de (2).

Ejercicio clínico

Caso 1

Una paciente de 59 años ingresa al servicio de urgencias por presentar déficit neurológico agudo. Dados los hallazgos del examen neurológico, se toman las IRM de la figura 5.16. Antes de leer los títulos de las figuras, responda las siguientes preguntas: ¿qué déficit motor y de qué lado presentará la paciente?, ¿qué déficit sensitivo y de qué lado presentará la paciente?, ¿cuál(es) par(es) craneano(s) estará(n) comprometido(s) y de qué lado?

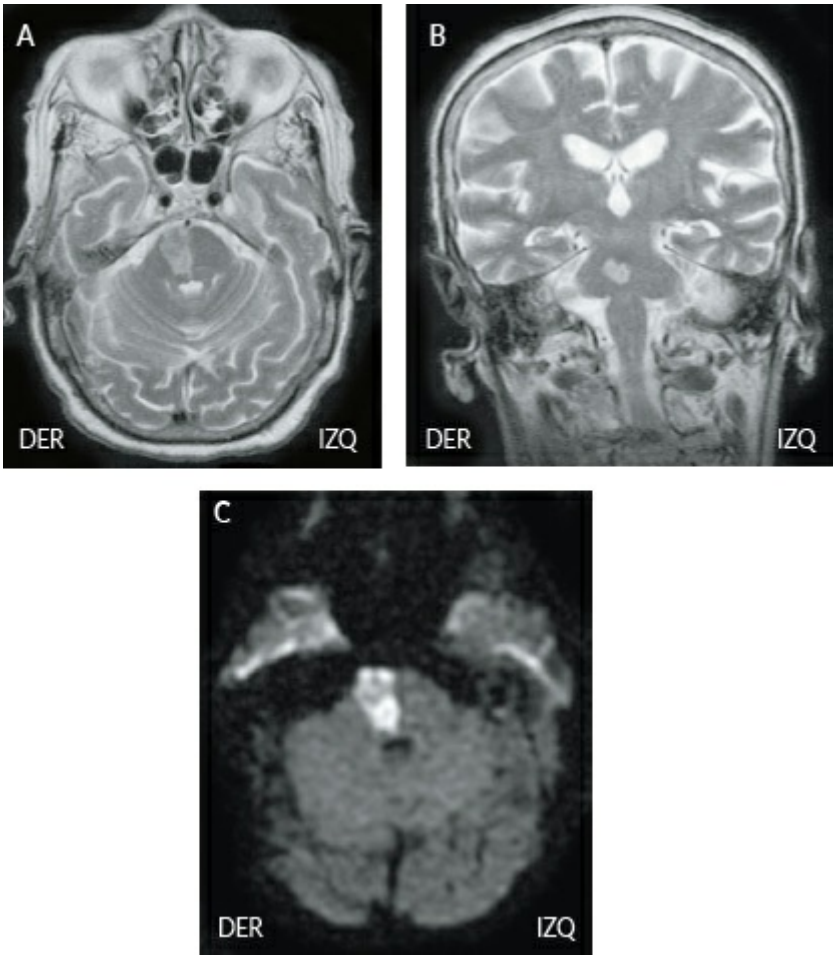


Figura 5.16A. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal que muestra lesión en el hemipuente derecho.
Figura 5.16B. IRM en T2 (T2–WI) de corte coronal que muestra la misma lesión de la imagen anterior.
Figura 5.16C. IRM en difusión que muestra lesión brillante sugestiva de infarto del hemipuente derecho. La paciente presentará hemiplejía y hemihipoestesia del hemicuerpo izquierdo y compromiso de los pares craneanos derechos VI y VII.

MÉDULA OBLONGADA O BULBO RAQUÍDEO

La médula oblongada está localizada entre el puente (arriba) y el cordón espinal (abajo). Se puede considerar como una extensión de este último por el número significativo de tractos que comparten. En la cara anterior de la médula (figura 5.17) se aprecian las pirámides, separadas por el surco medial anterior. El surco está obliterado en su porción inferior por el entrecruzamiento o decusación de las pirámides. En la cara lateral se observa la oliva, que está delimitada adelante por el surco preolivar, por donde emerge el par craneano XII (nervio hipogloso), y atrás por el surco retroolivar, por donde emergen los pares craneanos —de arriba abajo— ix (nervio glosofaríngeo), X (nervio vago) y XI (nervio accesorio o nervio espinal). Detrás de las olivas están los pedúnculos cerebelosos inferiores.

La cara posterior de la médula (figura 5.18) se divide en dos porciones: la inferior, que corresponde a la terminación del cordón espinal, y la superior, que conforma el triángulo inferior del piso del cuarto ventrículo. En la mitad inferior se halla la terminación de los fascículos grácil y cuneatus, que provienen del cordón espinal y forman dos prominencias: los tubérculos grácil (medial) y cuneatus (lateral). Estos fascículos y tubérculos transportan información propioceptiva y vibratoria de las extremidades inferiores (fascículo grácil) y superiores (fascículo cuneatus). En la mitad superior de la cara posterior —que corresponde al triángulo inferior del piso del cuarto ventrículo—, se encuentra el surco medial posterior, que es la continuación del surco espinal posterior. A ambos lados de este surco, se extiende la eminencia media, delimitada lateralmente por el surco limitante. Dentro de la eminencia, en orden descendente, se ubican: el triángulo (trígono) del hipogloso, el triángulo del vago y el área postrema. La región lateral a los triángulos corresponde al área vestibular o vestibulococlear.

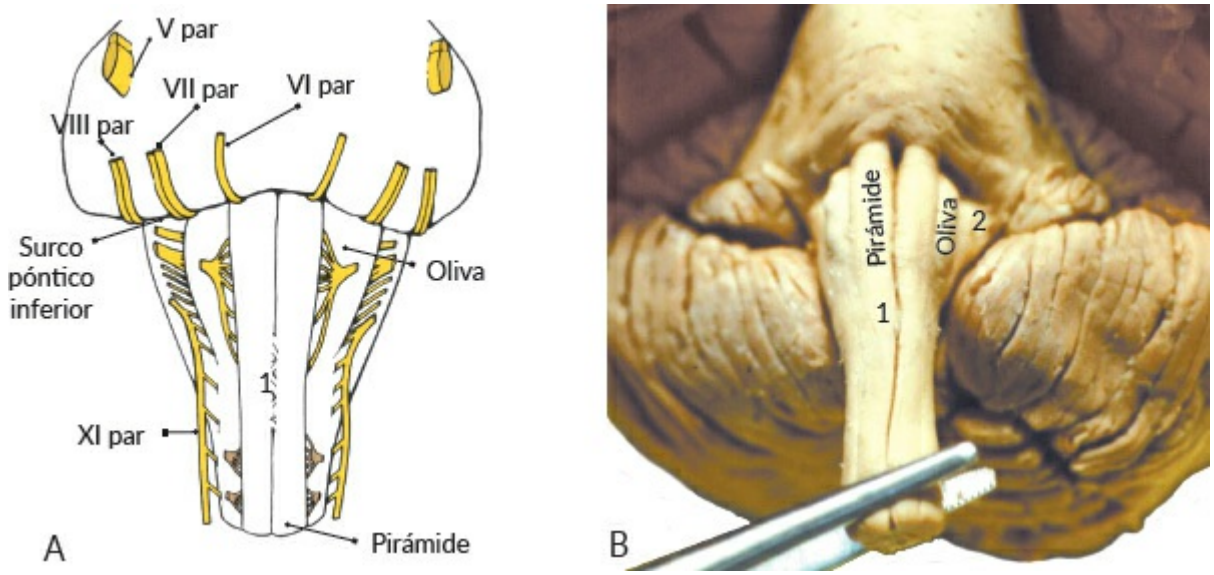


Figura 5.17A. Esquema de la médula en el que se aprecia la emergencia del par XII delante de las olivas y los pares IX, X, XI detrás de las olivas.

Figura 5.17B. Pieza anatómica de la médula. 1: decusación de las pirámides; 2: pedúnculo

cerebeloso inferior.

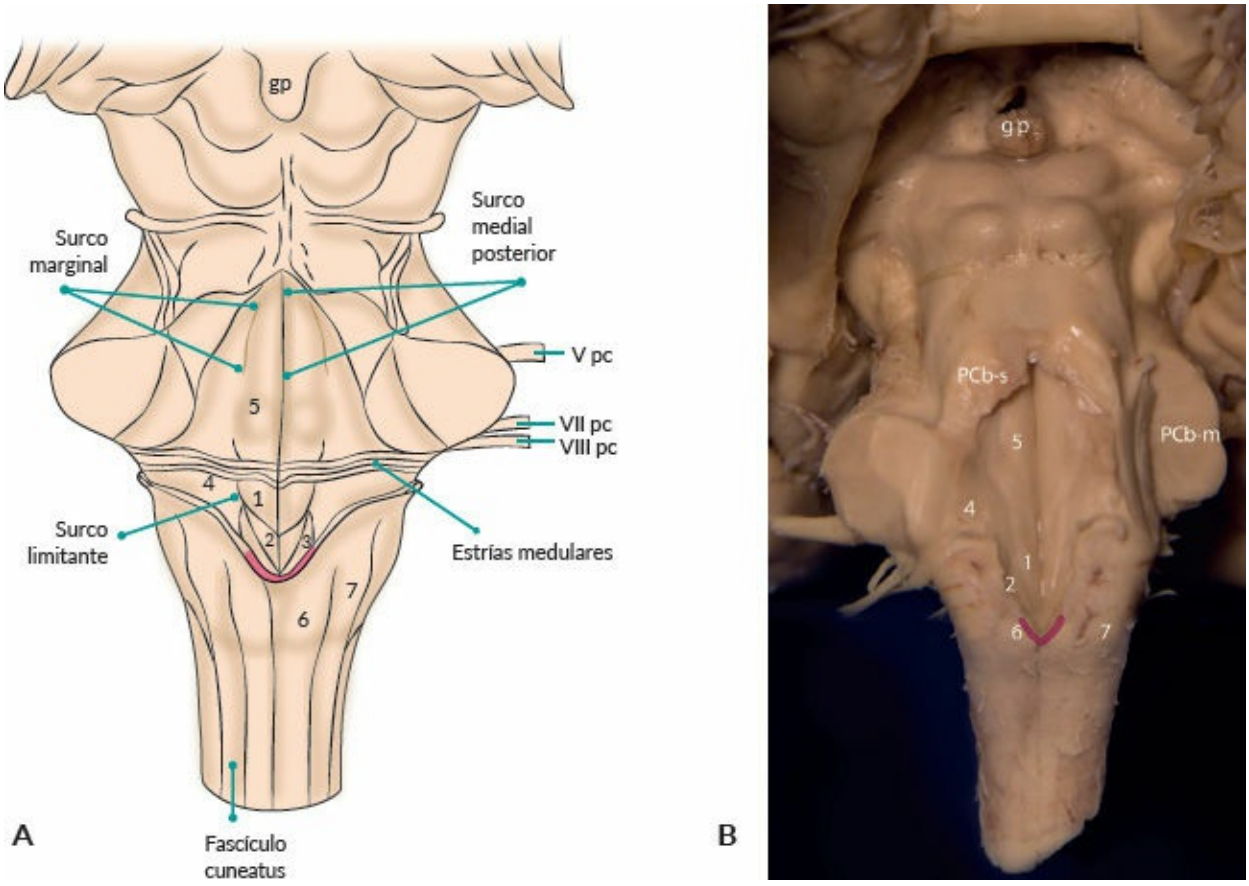


Figura 5.18A. Esquema del piso del cuarto ventrículo. gp: glándula pineal; 1: trígono del hipogloso; 2: trígono del vago; 3: área postrema; 4: trígono vestibular; 5: colículo facial; 6: tubérculo grácil; 7: tubérculo cuneatus; en violeta: obex.
Figura 5.18B. Pieza anatómica de corte similar al de la imagen anterior. gp: glándula pineal; PCb–s: pedúnculo cerebeloso superior; PCb–m: pedúnculo cerebeloso medio.

En su configuración interior, al igual que el puente, la médula se segmenta en dos regiones: la porción basal y el tegmento. En un corte a nivel de la mitad superior de las olivas se identifican: las pirámides (adelante), las olivas (mitad) y los pedúnculos cerebelosos inferiores (atrás). La porción basal está constituida por las olivas y las pirámides; la porción del tegmento está formada por la región posterior a las olivas (figura 5.19). A continuación, se hará una descripción de los principales núcleos y fascículos distribuidos en estas dos regiones.

Región basal de la médula

Está compuesta por las pirámides y las olivas. La porción ventromedial de cada pirámide contiene el tracto corticoespinal lateral, cruzado o vía piramidal cruzada. Cerca del 90 % de las fibras que forman este tracto se cruzan en la parte inferior de las pirámides (decusación de las pirámides) y descienden por la región lateral del cordón espinal. Detrás de las pirámides y en posición

medial, se sitúa el lemnisco medial. Las fibras de este lemnisco se desprenden de los tubérculos grácil y cuneatus de un lado, luego se dirigen hacia delante, se cruzan (decusación lemniscal) y ascienden hasta la región medial de la médula. Es decir, las fibras del lemnisco medial de un lado provienen de los tubérculos grácil y cuneatus del lado opuesto. La decusación lemniscal se presenta a nivel rostral, en relación con la decusación de las pirámides.

En la porción lateral de la región basal, la estructura más sobresaliente es el núcleo olivar inferior o complejo olivar inferior. Este complejo nuclear está constituido por varios grupos celulares que se proyectan a la corteza cerebelosa contralateral. El núcleo olivar inferior recibe información del cordón espinal a través de fibras espinoolivares y del núcleo rojo mediante fibras rubroolivares, que hacen parte del tracto del tegmento central. El complejo olivar inferior es un punto de relevo de información hacia el cerebelo necesario para la realización de movimientos suaves y coordinados.

Tegmento de la médula

En posición dorsal al lemnisco medial se encuentra el tracto tectoespinal. Este tracto contiene fibras descendentes que se originan en los colículos superiores y terminan en el segmento cervical del cordón espinal. Dorsal al tracto tectoespinal, se ubica el fascículo longitudinal medio, que mantiene su posición dorsomedial y, como ya se señaló, está formado por fibras ascendentes y descendentes. Estas últimas se originan en el núcleo vestibular medial y terminan en el segmento cervical del cordón espinal como el tracto vestibuloespinal medial. Estos dos tractos intervienen en los cambios de posición de la cabeza y el cuello de acuerdo a los estímulos visuales y vestibulares.

El núcleo espinal del trigémino tiene una posición medial respecto al pedúnculo cerebeloso inferior. Este núcleo está presente desde la porción inferior del puente hasta el cordón espinal. A lo largo del núcleo, las fibras descendentes del nervio trigémino se extienden caudalmente hasta los primeros segmentos cervicales, se ubican en posición lateral al núcleo y, en su recorrido descendente, forman sinapsis con los diferentes niveles del núcleo del trigémino. Detrás de las olivas y en posición lateral, se hallan los tractos espinocerebelosos ventral (anterior) y dorsal (posterior), el tracto espinotalámico ventrolateral y el tracto rubroespinal. En posición dorsolateral a estas estructuras, se sitúa el pedúnculo cerebeloso inferior (figura 5.19A). En la parte central de la médula está la formación reticular, que, como ya se mencionó, es un complejo de grupos nucleares unidos por una gran red de fibras nerviosas. Su estructura y organización funcional se analizarán en detalle más adelante. Basta decir por ahora que está involucrada en la modulación de la transmisión de la información sensorial a la corteza

cerebral, la regulación de la actividad motora y autonómica, la regulación del sueño y la vigilia, y la modulación de comportamientos emocionales.

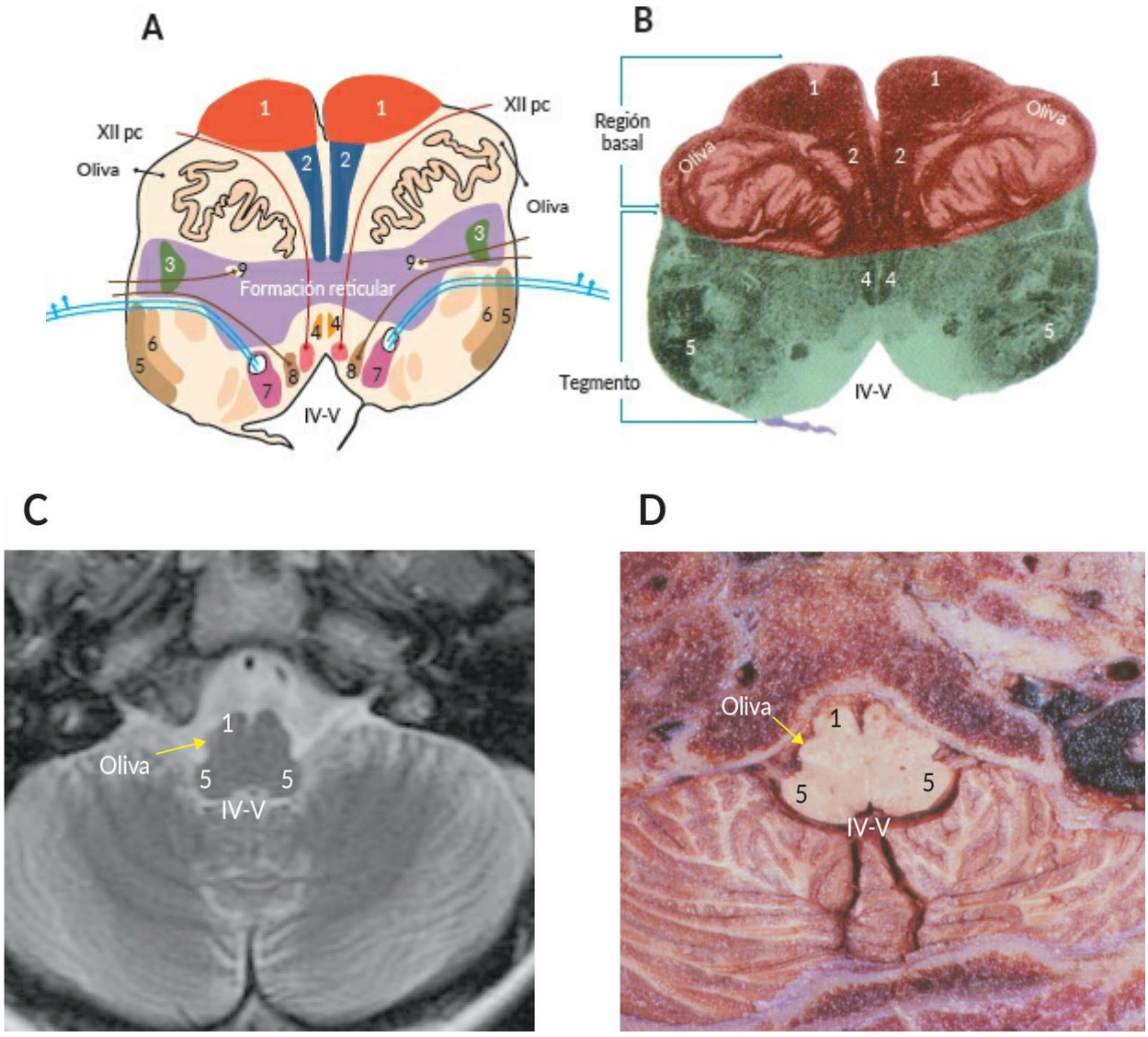


Figura 5.19A. Esquema de un corte transversal de la médula. 1: pirámides; 2: lemnisco medial; 3: fascículo espinotalámico ventrolateral; 4: fascículo longitudinal medio; 5: pedúnculo cerebeloso inferior; 6: núcleo espinal del trigémino; 7: núcleo solitario; 8: núcleo motor dorsal del vago; 9: núcleo ambiguo.
Figura 5.19B. Corte transversal anatómico de la médula con algunas estructuras mencionadas en la imagen anterior. En rojo: porción basal; en verde: tegmento. **Fuente:** adaptada de (1).
Figura 5.19C. IRM en T2 (T2–WI) de la médula con algunas estructuras señaladas en la figura 5.19A.
Figura 5.19D. Corte transversal anatómico similar al de la imagen anterior. IV–V: cuarto ventrículo.

En la porción superior del tegmento se encuentran los núcleos cocleares (ventral y dorsal), que reciben fibras auditivas del par craneano viii, y los núcleos vestibulares (superior, lateral, medial e inferior), que reciben fibras vestibulares del mismo par craneano. Además, se localizan diferentes núcleos de pares craneanos incluyendo: el núcleo del hipogloso (par craneano XII), el

núcleo ambiguo (pares IX, X y XI) y los núcleos autonómicos como el solitario (pares VII, IX y X) y el motor dorsal del vago (figura 5.19).

El núcleo del hipogloso mantiene una posición medial en la médula, detrás del fascículo longitudinal medio. Sus fibras se dirigen hacia delante, abandonan la médula por el surco preolivar e inervan los músculos intrínsecos y extrínsecos de la lengua. Lateral al núcleo del hipogloso, se sitúa el núcleo ambiguo, que da origen a los pares craneanos IX, X y XI. Estos pares inervan los músculos de la faringe y la laringe y controlan la fonación y la deglución. En posición más lateral, se ubica el núcleo motor dorsal del vago, de donde emergen fibras parasimpáticas preganglionares que acompañan al par craneano x y terminan inervando estructuras viscerales torácicas y abdominales. El núcleo salivatorio inferior origina fibras viscerales que acompañan al par craneano ix e inervan el ganglio ótico, de donde se desprenden fibras que inervan la glándula parótida. Delante del núcleo motor dorsal del vago se encuentra el núcleo solitario. La porción caudal de este núcleo recibe información proveniente de vasos sanguíneos y otros órganos viscerales a través de los pares IX y X. La porción superior recibe información gustativa a través de los pares VII, IX y X. De esta forma, el núcleo solitario contiene dos grupos neuronales que median funciones diferentes: uno asociado con reflejos cardiovasculares y respiratorios y el otro relacionado con el gusto. Las figuras 5.20 y 5.21 presentan la distribución de los núcleos de los pares craneanos mencionados y de los fascículos que transcurren a través del neuroeje.

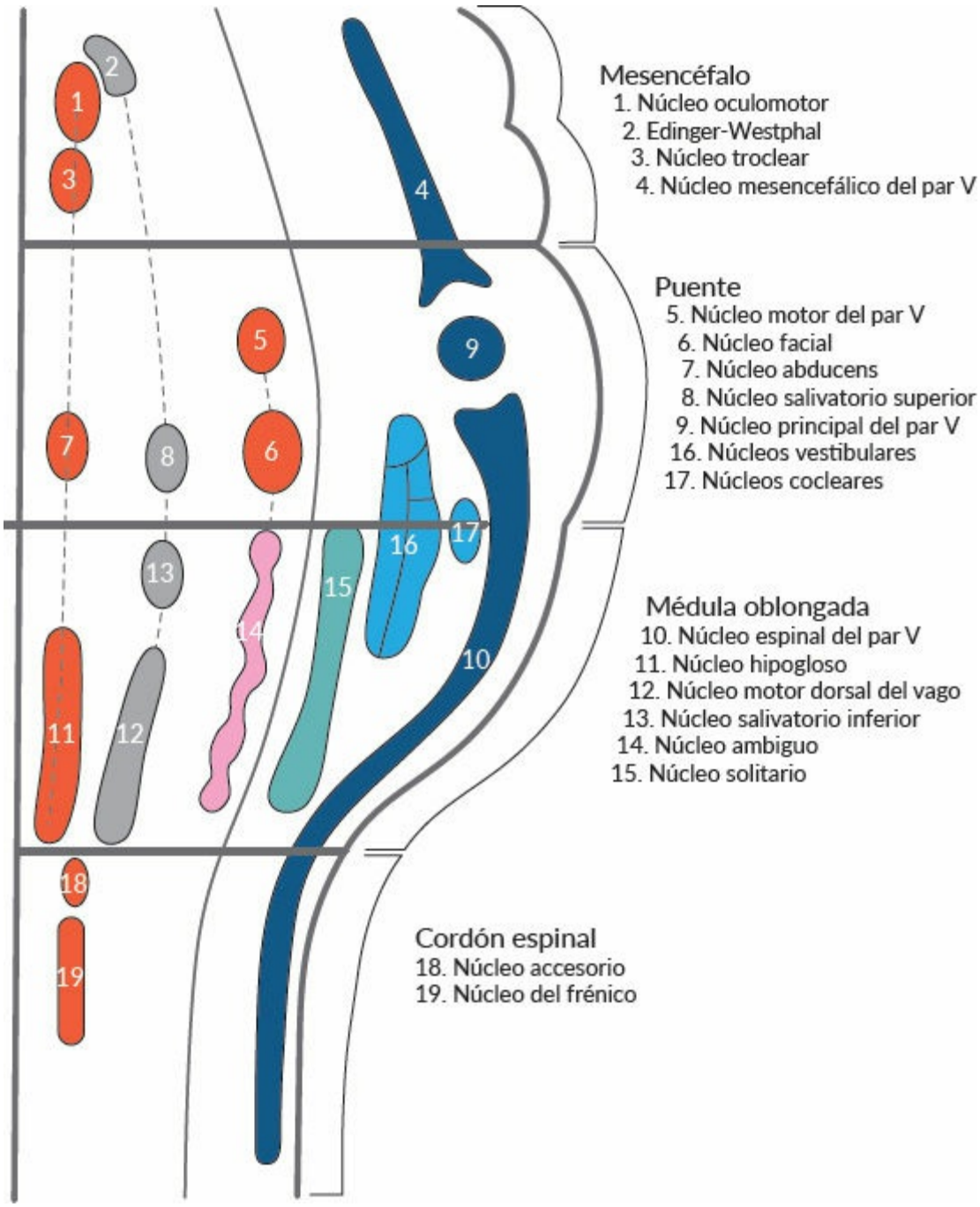


Figura 5.20. Esquema de la distribución de los núcleos de los pares craneanos a nivel del tronco cerebral.

Como muestra la figura 5.21, el fascículo corticoespinal o vía piramidal (en rojo), que tiene motoneuronas superiores, se origina en la corteza cerebral motora, desciende por el brazo posterior de la cápsula interna (1) y por la porción anterior del tronco cerebral, se cruza en la decusación de las pirámides medulares (2), desciende por el haz corticoespinal lateral (3) y termina haciendo sinapsis con las motoneuronas inferiores (4). Un pequeño grupo de fibras corticoespinales no se cruzan y descienden por el haz corticoespinal ventral o anterior (5). Dentro del fascículo corticoespinal, un grupo de motoneuronas terminan haciendo sinapsis en el tronco cerebral con

pares craneanos motores (haz corticobulbar o corticotroncal).

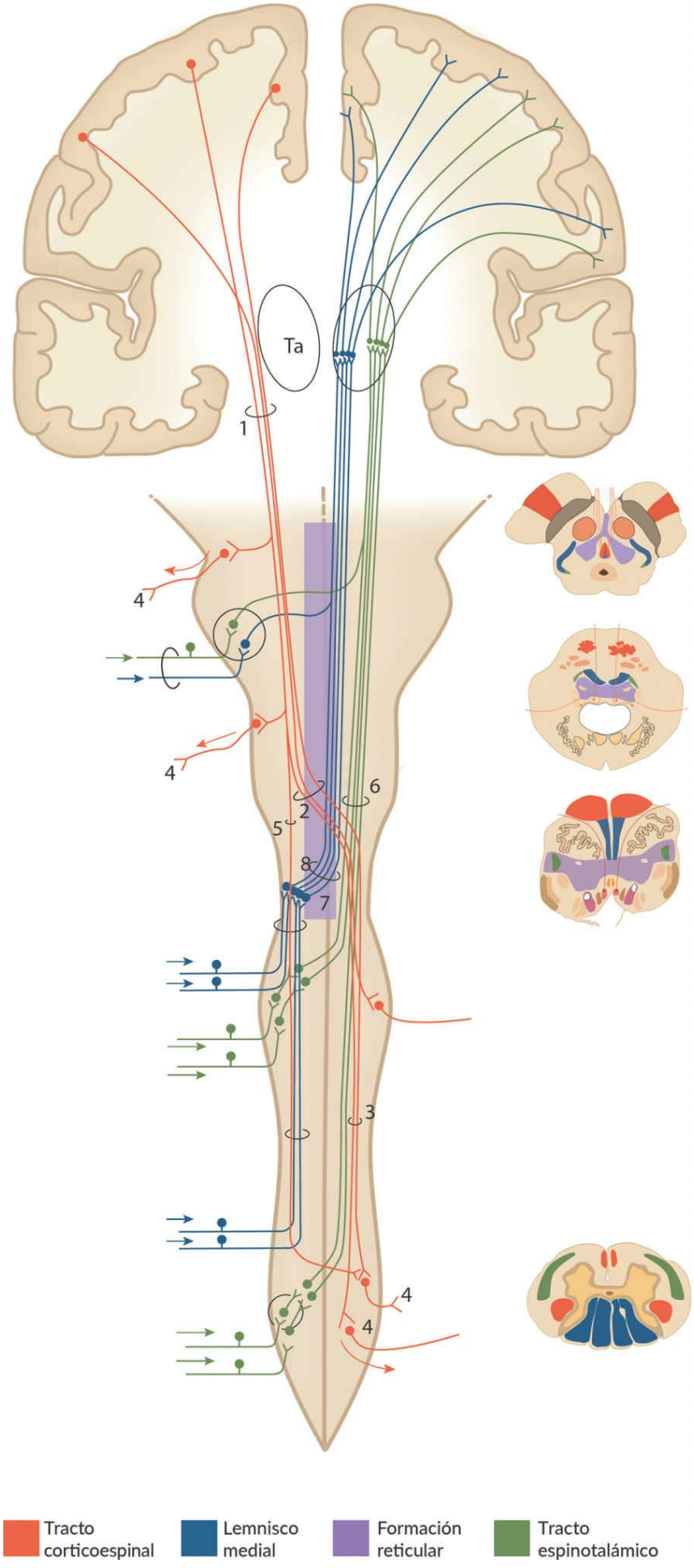

Ta
1
4
4
2
5
6
8
7
3
4
4
Tracto corticoespinal
Lemnisco medial
Formación reticular
Tracto espinotalámico

Figura 5.21. Esquema del recorrido de tres de los fascículos ubicados en el tronco cerebral.

En la misma figura se observa que el fascículo espinotalámico ventrolateral (en verde) se origina y se cruza en el cordón espinal, asciende por los cordones anteriores y laterales del cordón espinal (6), continúa su ascenso a lo largo de todo el tronco cerebral hasta alcanzar el núcleo ventral posterior lateral del tálamo (Ta). De allí, se originan fibras que ascienden por el brazo posterior de la cápsula interna y terminan en la circunvolución postcentral, la ínsula y el giro del cíngulo. Este fascículo lleva información de dolor (nociceptiva) del hemicuerpo del lado opuesto. Los fascículos grácil y cuneatus (en azul) ascienden por el cordón posterior del cordón espinal y terminan en los tubérculos grácil y cuneatus (7). De allí, nace el lemnisco medial que se cruza (8) y asciende por el tronco cerebral hasta alcanzar el núcleo ventral posterior medial del tálamo. Desde allí, se originan fibras que ascienden por el brazo posterior de la cápsula interna y terminan en la circunvolución postcentral de la corteza cerebral sensitiva. La formación reticular (en violeta) parte del cordón espinal y se extiende a lo largo de todo el tronco cerebral.

Ejercicios clínicos

Caso 1

En las horas de la mañana, un paciente de 68 años súbitamente presenta dificultad para deglutir saliva (disfagia) y para articular palabras (disartria). Además, presenta adormecimiento en la hemicara izquierda (hipoestesia) e imposibilidad para realizar movimientos finos con su mano izquierda (dismetría). Se realiza la IRM cerebral que aparece en la figura 5.22.

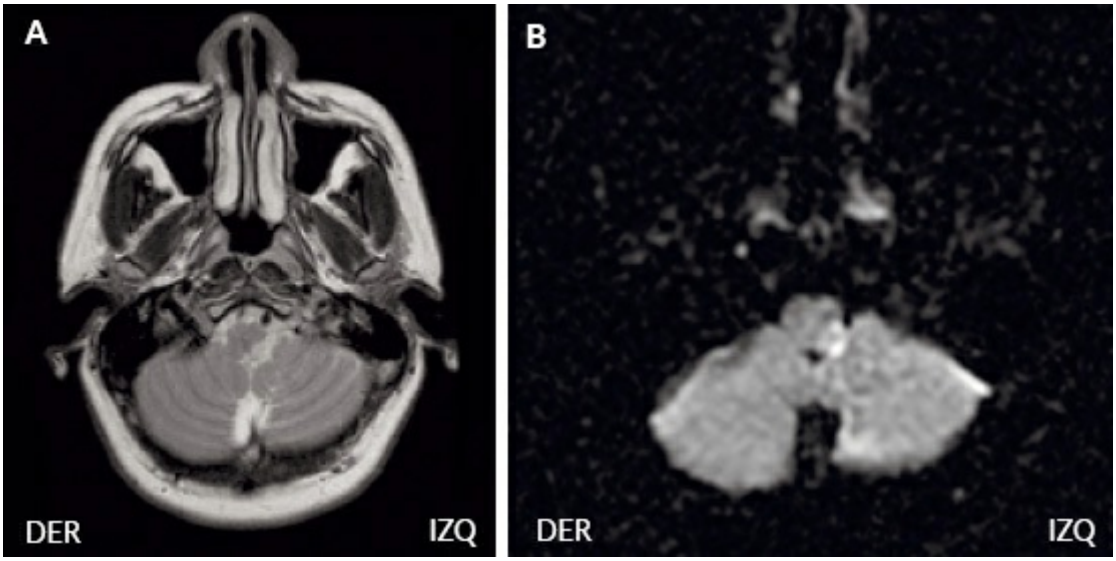
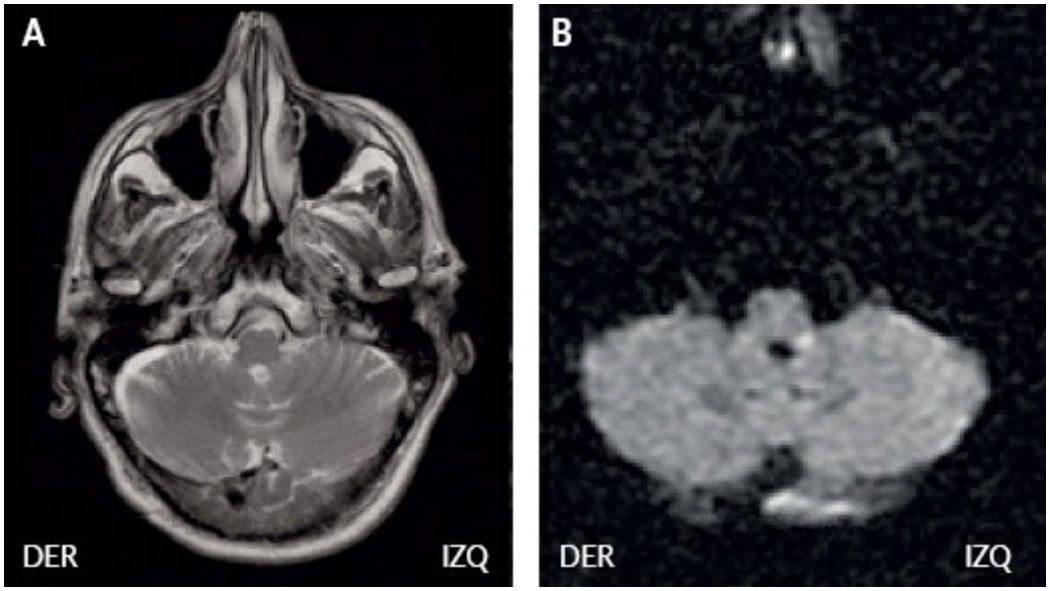


Figura 5.22A. IRM en T2 (T2–WI) que muestra lesión hiperintensa en la porción posterolateral izquierda de la médula.
Figura 5.22B. IRM en difusión que muestra lesión brillante en la región posterolateral izquierda de la médula.

Respuesta: los hallazgos son compatibles con infarto medular posterior (síndrome de Wallemberg). Se sugiere al lector revisar la figura 5.19A para observar las estructuras comprometidas que explican los síntomas de este síndrome: pedúnculo cerebeloso inferior, núcleo del par v y núcleos de los pares medulares.

Caso 2

Un paciente de 72 años se despierta en la madrugada con dolor súbito en la hemicara izquierda e imposibilidad para levantarse por tendencia a caer hacia el lado izquierdo. El examen físico determina hipoestesia en la hemicara izquierda y dismetría izquierda. Se realiza la IRM cerebral que aparece en la figura 5.23. ¿Considera que los hallazgos de la IRM se correlacionan con el cuadro clínico del paciente?



Respuesta: los hallazgos sugieren compromiso del núcleo del par v y del pedúnculo cerebeloso inferior que desencadena los síntomas del paciente.

CEREBELO

Aunque el cerebelo (cerebro pequeño) corresponde al 10 % de la masa encefálica, su población neuronal es inmensa. Está unido a la parte posterior del tronco cerebral mediante tres pares de pedúnculos cerebelosos. Los

pedúnculos cerebelosos superiores o brazos conjuntivos unen el cerebelo con la porción posterolateral del mesencéfalo. Estos dos pedúnculos están unidos entre sí por el velo medular superior y contienen fibras eferentes cerebelosas que se dirigen hacia el núcleo rojo y el núcleo ventrolateral del tálamo, que a su vez se proyecta a la corteza motora. Los pedúnculos cerebelosos medios o brazos pónticos unen el cerebelo con el puente y contienen miles de fibras que provienen de los núcleos pónticos contralaterales, constituyendo una conexión entre la corteza cerebral y la corteza cerebelosa. Los pedúnculos cerebelosos inferiores o cuerpos restiformes unen el cerebelo con la médula y contienen fibras que provienen del cordón espinal y de la porción inferior de la médula. En resumen, los pedúnculos cerebelosos inferiores y medios contienen fibras aferentes, mientras que los pedúnculos cerebelosos superiores tienen fibras eferentes.

El cerebelo tiene cara superior, cara anterior, cara inferior y cara posterior. Para analizar su cara anterior, es necesario remover el tronco cerebral (figura 5.24). En la superficie cerebelosa se identifica una gran cantidad de surcos, con orientación transversa en su mayoría. Esto permite aumentar el área cortical en un volumen reducido. La corteza cerebelosa entre los surcos se denomina folia. En la superficie exterior del cerebelo, se encuentra el surco o fisura horizontal, que contornea la circunferencia de los hemisferios cerebelosos y delimita la cara superior de la cara inferior. En la cara anterior, el surco horizontal se prolonga como el surco posterolateral (figuras 5.24 y 5.25).

El cerebelo está constituido por dos hemisferios unidos por una estructura medial: el vermis del cerebelo. El cerebelo se divide en tres grandes lóbulos: el anterior, el posterior y el floculonodular. Cada lóbulo contiene una porción del vermis y de los dos hemisferios. En la cara superior, se aprecia el surco primario, que delimita dos lóbulos cerebelosos: el anterior, delante del surco primario, y parte del lóbulo posterior, detrás del surco primario (figura 5.25). El lóbulo anterior recibe aferencias que provienen del cordón espinal y cumple una función fundamental en la coordinación de los movimientos del tronco y las extremidades. En la cara anterior se aprecia el lóbulo floculonodular, o vestibulocerebeloso, que está constituido por los dos flóculos y el nódulo, que es la porción más anterior de la cara inferior del vermis. Encima del surco posterolateral, se encuentran los dos flóculos, debajo de este, las tonsilas o amígdalas cerebelosas, que hacen parte del lóbulo posterior (figura 5.25).

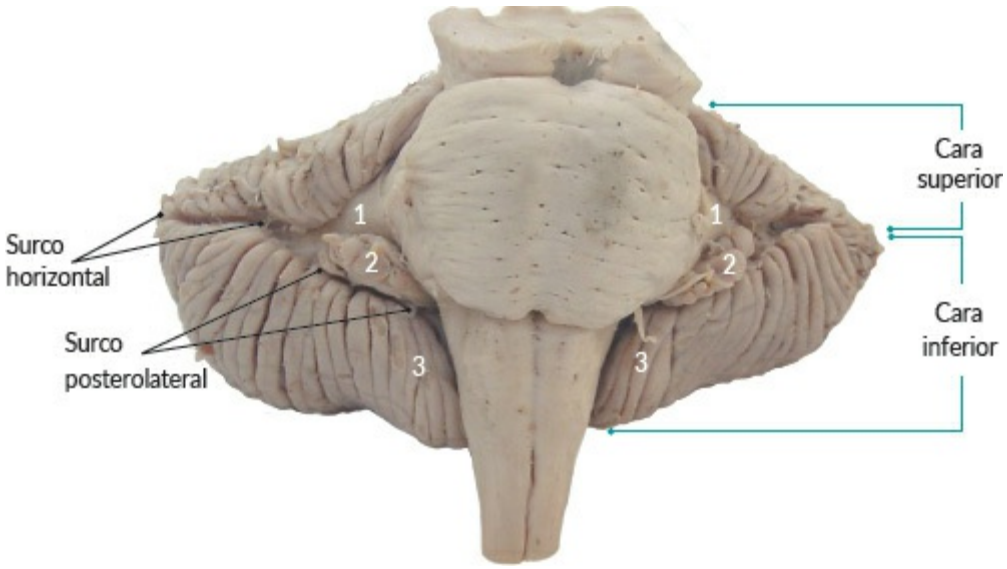
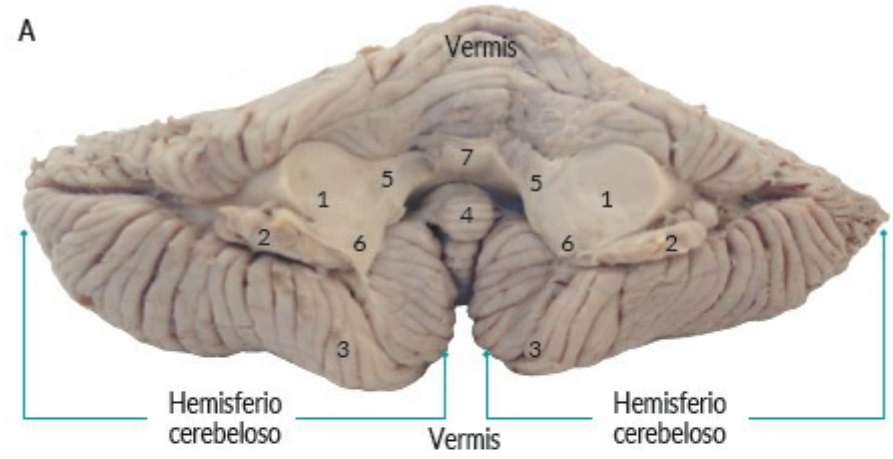


Figura 5.24. Vista anatómica anterior del tronco cerebral y del cerebelo. 1: pedúnculo cerebeloso medio o brazo póntico; 2: flóculo; 3: tonsila o amígdala cerebelosa.



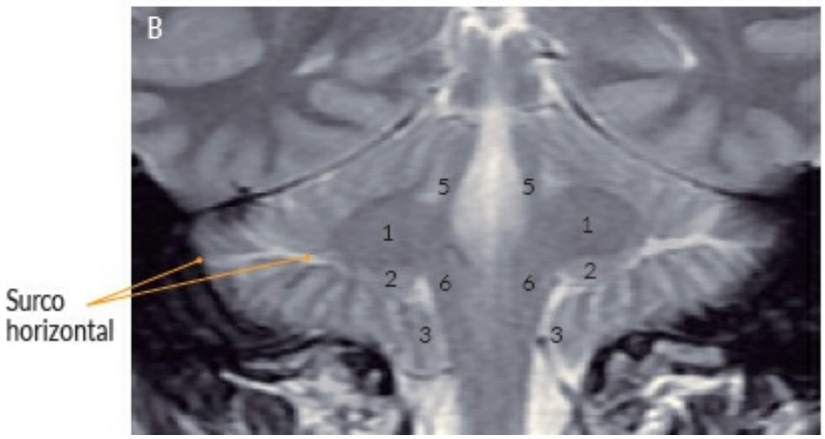


Figura 5.25A. Pieza anatómica de la cara anterior del cerebelo. 1: pedúnculo cerebeloso medio; 2: flóculo; 3: tonsila cerebelosa; 4: nódulo; 5: pedúnculo cerebeloso superior; 6: pedúnculo cerebeloso inferior; 7: velo medular superior.
Figura 5.25B. IRM en T2 (T2–WI) de corte coronal del cerebelo. 1: pedúnculo cerebeloso medio; 2: flóculo; 3: tonsila cerebelosa; 5: pedúnculo cerebeloso superior; 6: pedúnculo cerebeloso inferior.

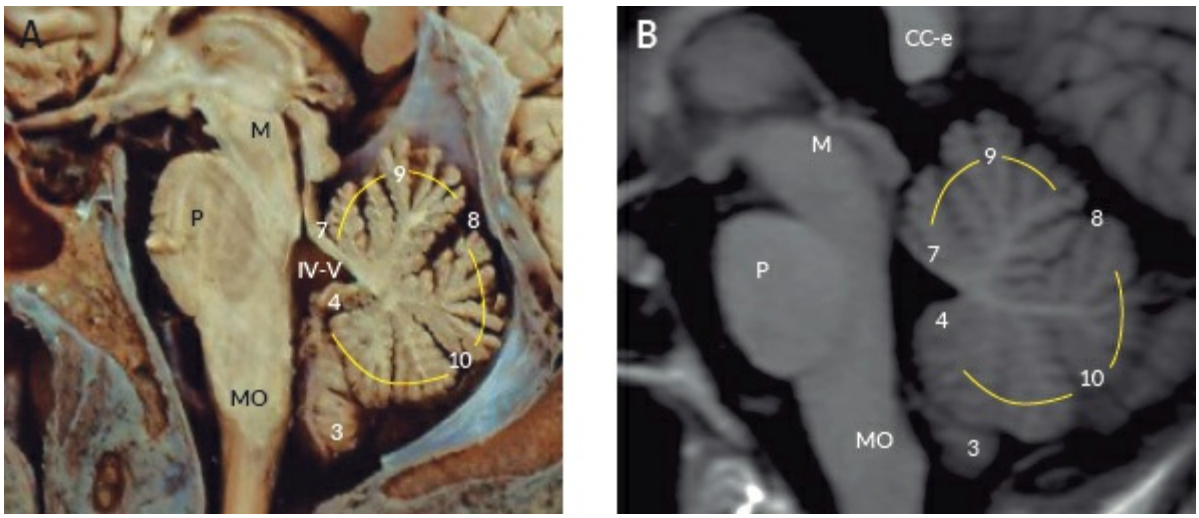


Figura 5.25C. Corte anatómico sagital del cerebelo a nivel del vermis. 3: tonsila cerebelosa; 4: nódulo; 7: velo medular superior; 8: surco primario; 9: lóbulo anterior; 10: lóbulo posterior; IV–V: cuarto ventrículo; M: mesencéfalo; P: puente; MO: médula oblongada.
Figura 5.25D. IRM en T1 (T1–WI) de corte sagital similar al de la imagen anterior. CC–e: esplenio del cuerpo calloso.

El más grande de los tres lóbulos, el lóbulo posterior, se localiza detrás del lóbulo primario, en la cara superior, y ocupa toda la cara inferior del cerebelo hasta su límite con los flóculos y el nódulo. A través de los núcleos pónticos, este lóbulo recibe la mayor parte de las aferencias provenientes de la corteza cerebral, de los núcleos vestibulares y del aparato vestibular. También recibe aferencias de la formación reticular y del núcleo olivar inferior. La configuración interna del cerebelo incluye: la corteza cerebelosa, la sustancia blanca (profunda a la corteza) y cuatro pares de núcleos cerebelosos inmersos en la sustancia blanca (figura 5.26).

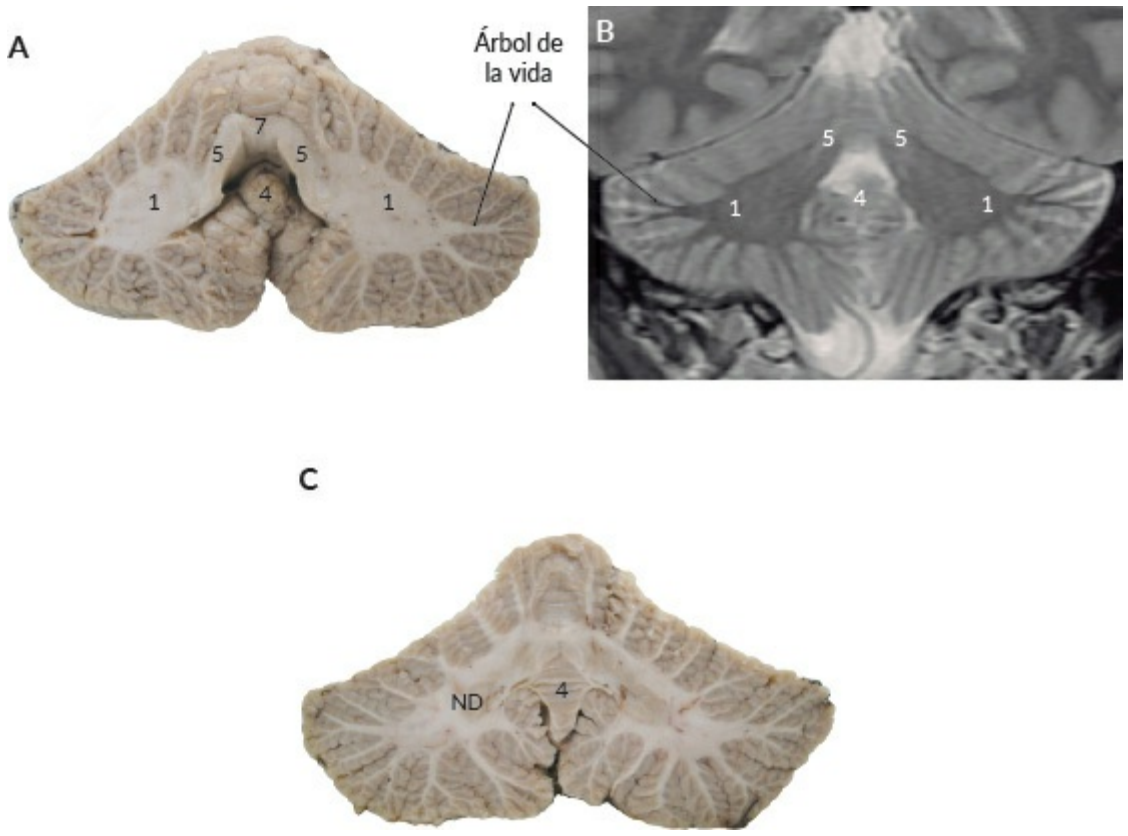


Figura 5.26A. Corte coronal anatómico del cerebelo a la altura de los pedúnculos cerebelosos medios. 1: pedúnculo cerebeloso medio; 4: nódulo; 5: pedúnculo cerebeloso superior; 7: velo medular superior.
Figura 5.26B. IRM en T2 (T2–WI) con las estructuras señaladas en la figura anterior.
Figura 5.26C. Corte coronal anatómico del cerebelo ligeramente más posterior que el corte de la figura 5.26A. 4: flóculo; ND: núcleo dentado.

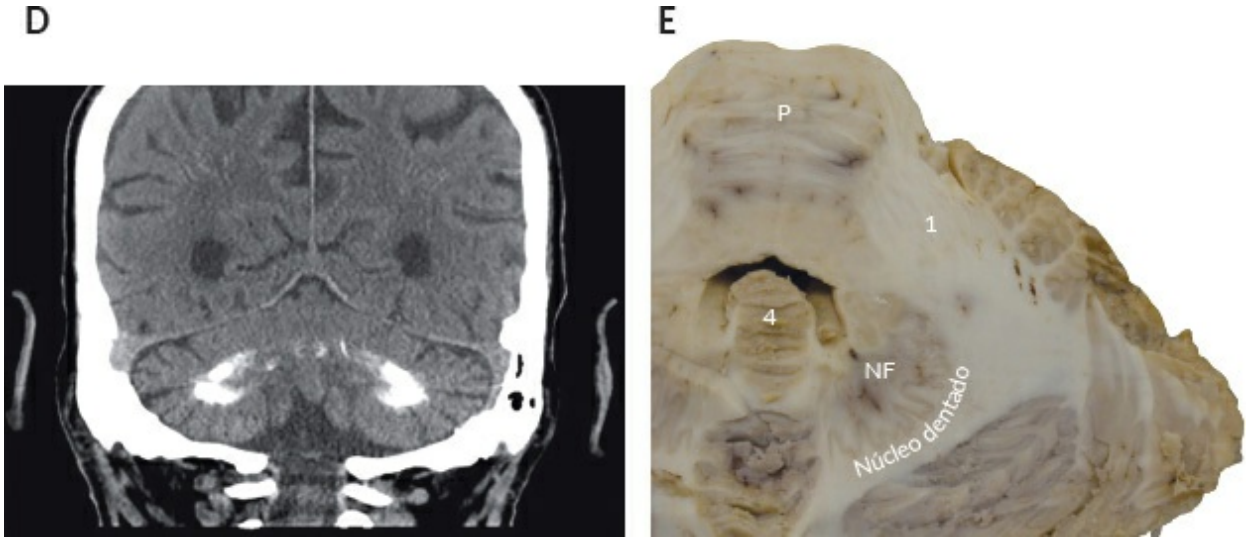


Figura 5.26D. TAC cerebral simple de corte coronal de un paciente con hiperparatiroidismo secundario a enfermedad renal en la que se aprecia calcificación de los núcleos dentados.
Figura 5.26E. Corte transversal anatómico a nivel de los pedúnculos cerebelosos medios. 1: pedúnculo cerebeloso medio; 4: flóculo; P: puente; NF: núcleo fastigial.

Los núcleos laterales más voluminosos son los núcleos dentados, cuyas

proyecciones se dirigen hacia los núcleos rojos y el tálamo. Los núcleos más mediales corresponden a los fastigiales, cuya principal proyección incluye los núcleos reticulares y vestibulares. Entre los núcleos dentados y los fastigiales de cada lado, se encuentran dos núcleos pequeños: el globoso y el emboliforme, cuyos axones se dirigen al núcleo rojo. En especies inferiores, estos dos núcleos están fusionados y se conocen como núcleo interpuesto. Las fibras que emergen de estos cuatro pares de núcleos constituyen la principal vía eferente del cerebelo.

CUARTO VENTRÍCULO

Como se mencionó antes, el cuarto ventrículo es la cavidad ubicada entre el cerebelo, el puente y la porción rostral de la médula. Tiene cuatro ángulos: el superior —que recibe la desembocadura inferior del acueducto cerebral—, los laterales (derecho e izquierdo) —llamados también recesos laterales— y el inferior —que presenta la desembocadura superior del conducto ependimario — (figura 5.18). El techo del cuarto ventrículo está formado por el velo medular superior, los pedúnculos cerebelosos superiores (brazos conjuntivos) y el velo medular inferior (membrana tectoria). Esta membrana contiene plexos coroideos y es similar a la que forma el techo del tercer ventrículo. El piso del cuarto ventrículo (fosa romboidea) tiene forma de rombo formado por dos triángulos: uno superior póntico y otro inferior medular (figura 5.18). Las paredes laterales de este ventrículo están formadas por todos los pedúnculos cerebelosos, si bien los medios aportan mayor volumen. El cuarto ventrículo se comunica con el espacio subaracnoideo mediante dos aperturas laterales (agujeros de Luschka) y una medial (agujero de Magendie) ubicada en el velo medular inferior.

PLEXOS COROIDEOS

Los cuatro ventrículos contienen cordones de estructuras altamente intrincadas, con múltiples pliegues y de material membranoso–vascular llamados plexos coroideos. En ciertas regiones, la piamadre se invagina hacia las cavidades ventriculares, junto con el tejido ependimario que tapiza los ventrículos, y se une a arteriolas, vénulas y vasos capilares para formar así los plexos coroideos. Así pues, el plexo coroideo es un complejo de epéndima, pía y capilares sanguíneos. En los ventrículos laterales, el plexo coroideo se ensancha a nivel del atrio, esto se denomina glomus, del latín para «bola de hilos» (figura 5.27A). Los plexos coroideos y el glomus se calcifican con el paso de los años, esto se puede apreciar en estudios de tac cerebral (figura 5.27B).

Los plexos coroideos de los ventrículos laterales de cada hemisferio cerebral atraviesan el agujero interventricular y se ubican en el techo del tercer ventrículo. Por su pequeño diámetro, el acueducto cerebral no contiene plexo coroideo; de manera que está tapizado solo por ependimoglía. El plexo coroideo del cuarto ventrículo está formado por una invaginación del velo medular inferior hacia la mitad inferior de la cavidad ventricular. Tiene la forma de una T: la línea vertical está formada por dos prolongaciones coroideas que se extienden hasta el agujero medial, y la línea transversal está conformada por las prolongaciones coroideas que terminan en los recesos laterales (figura 5.27C) o agujeros de Luschka y que se protruyen directamente en el espacio subaracnoideo.

Funcionalmente, el plexo coroideo es una membrana de tres capas entre los capilares y el líquido cefalorraquídeo (LCR), con múltiples pliegues que garantizan una mayor superficie. La primera capa es la pared endotelial de los capilares, que por estar fenestrada (agujereada) permite el paso de sustancias, a diferencia de las paredes capilares de otras partes del encéfalo. La segunda capa está constituida por células piales (piamadre) y tejido colágeno. La tercera capa (la más externa) es el epitelio coroideo, que está formado por ependimoglía y tapiza las cavidades ventriculares. Por sus características histológicas, se ha concluido que las células del epitelio coroideo se especializan en secreción. A principios del siglo XX, Harvey Cushing demostró que los plexos coroideos son los encargados de secretar LCR. En 24 horas, se produce alrededor de medio litro de LCR.

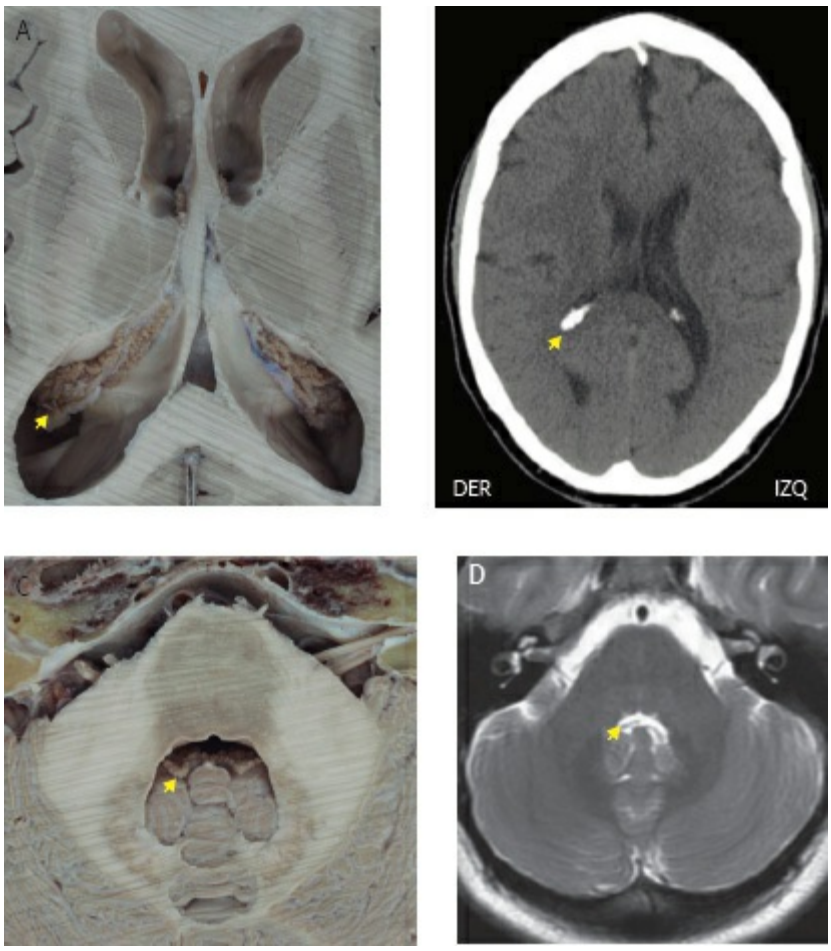


Figura 5.27A. Corte transversal anatómico a nivel de los ventrículos cerebrales en el que se aprecia el glomus coroideo en el atrio ventricular (►).
Figura 5.27B. TAC cerebral simple en la que se observa calcificación de los plexos coroideos a nivel del glomus (►).
Figura 5.27C. Corte transversal anatómico a nivel del puente en el que se aprecia la porción horizontal del plexo coroideo (►) dentro del cuarto ventrículo.
Figura 5.27D. IRM en T2 (T2–WI) en la que se observa la porción horizontal del plexo coroideo (►) dentro del cuarto ventrículo.

Ejercicios clínicos

Caso 1

Una mujer de 36 años ingresa al servicio de urgencias por presentar cuadro de inestabilidad para caminar, náuseas y vómito de tres días de evolución. Los hallazgos del examen neurológico sugieren lesión del tronco cerebral, por lo que se toman las IRM de la figura 5.28. ¿Qué hallazgos detecta usted en las imágenes?

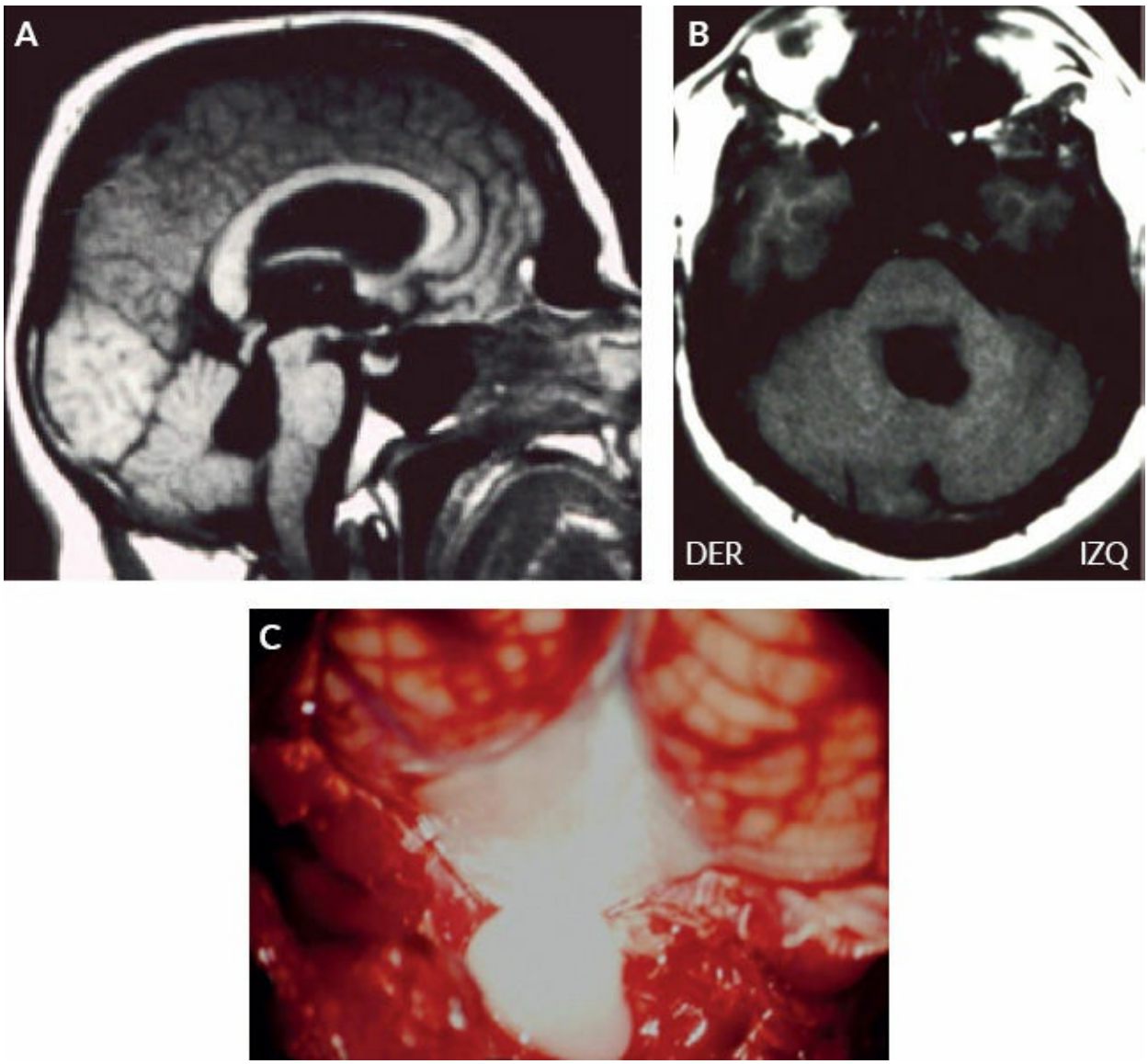


Figura 5.28A. IRM en T1 (T1–WI) de corte sagital en la que se detecta ampliación anormal del cuarto ventrículo y del acueducto cerebral.
Figura 5.28B. IRM en T1 (T1–WI) de corte transversal en la que se detecta ampliación anormal del cuarto ventrículo.
Figura 5.28C. Pieza quirúrgica que muestra parásito cisticerco localizado en el cuarto ventrículo. Compare esta imagen con la de la figura 5.28B.

Caso 2

De las dos imágenes en secuencia T1 (T1–WI) a nivel de la unión del tronco cerebral con el cordón espinal (figura 5.29), ¿cuál considera usted que es anormal?, ¿por qué?

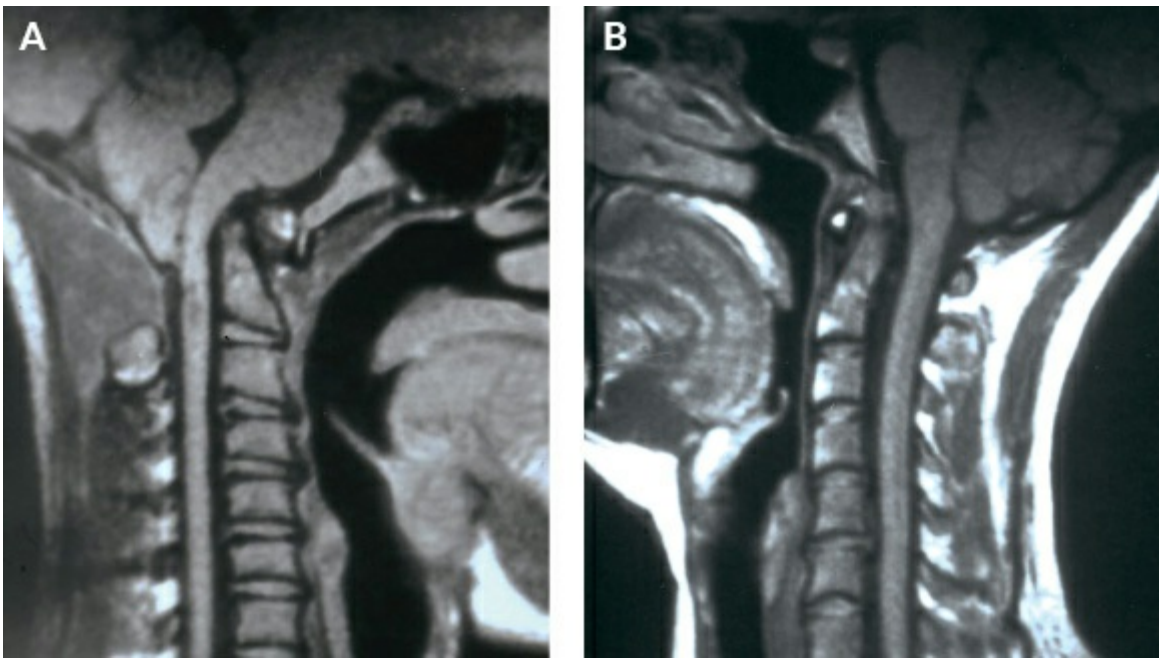


Figura 5.29A. IRM en T1 (T1–WI) de corte sagital que muestra descenso del cerebelo dentro del canal raquídeo. Esta condición se conoce como malformación Arnold–Chiari.
Figura 5.29B. IRM en T1 (T1–WI) de corte sagital que muestra cerebelo sin anomalías.

REFERENCIAS

1. Nolte J. The human brain: an introduction to its functional anatomy. 6.a ed. St. Louis: Mosby/Elsevier; 2009.
2. Takahashi J, Shibata T, Sasaki M, Kudo M, Yanezawa H, Obara S, et al. Detection of changes in the locus coeruleus in patients with mild cognitive impairment and Alzheimer´s disease: high–resolution fast spin–echo T1–weighted imaging. Geriatr Gerontol Int. 2015;15(3):334–40.

LECTURAS RECOMENDADAS

1. Siegel A, Sapru H. Essential neuroscience. 2.ª ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2009.
2. Gruber P, Gould D. The red nucleus: past, present, and future. Neuroanatomy. 2010;9:1–3.
3. Benarroch E. Basic neurosciences with clinical applications. Philadelphia: Elsevier Health Sciences; 2006.
4. Paxinos G, Mai J. The human nervous system. 2.ª ed. San Diego: Elsevier Academic Press; 2004.

CAPÍTULO 6

CORDÓN ESPINAL

El cordón espinal es una estructura esencial para la transmisión de información sensitiva hacia el encéfalo y para la regulación de la actividad motora y autonómica. Recibe información proveniente de receptores somáticos y viscerales por medio de las raíces posteriores y la retransmite hacia el encéfalo a través de fascículos ascendentes. Recibe también señales de centros superiores mediante fascículos o tractos descendentes y las transmite a órganos somáticos o viscerales a través de las raíces anteriores. El cordón espinal también integra numerosos reflejos.

CONFIGURACIÓN EXTERIOR

El cordón espinal se encuentra dentro del conducto raquídeo o canal vertebral, rodeado por las meninges y el líquido cefalorraquídeo. Se extiende desde el agujero magno —donde se prolonga rostralmente en la médula— hasta la segunda vértebra lumbar (figura 6.1). Por su forma, la porción caudal del cordón espinal se conoce como cono medular. Del cono, se desprende un filamento delgado de piamadre que contiene glía y forma el filum terminale o hilo terminal. Este se dirige hacia abajo hasta unirse al ligamento coccígeo, una prolongación caudal de la duramadre que se inserta en el coxis, anclando de esa manera el cordón espinal. El cordón espinal ocupa el conducto raquídeo en toda su extensión hasta el tercer mes de vida fetal. Luego, su crecimiento se hace más lento que el de la columna vertebral y, por tal razón, en el adulto solo ocupa dos tercios superiores del canal espinal.

El cordón espinal es un cilindro que mide 50 cm de largo y entre 1 y 1.5 cm de ancho. Presenta tres caras: anterior (ligeramente aplanada), lateral y posterior. En su extensión se identifican dos engrosamientos: el cervical y el lumbar, que corresponden a las regiones donde se originan los nervios de las extremidades superiores e inferiores, respectivamente. En la línea media vertical de toda la cara anterior se observa el surco espinal anterior, por el que transcurre la arteria espinal anterior. De igual manera, la línea media de la cara posterior es marcada por el surco espinal posterior, que es mucho más superficial que el anterior. Una línea imaginaria que uniera estos surcos dividiría el cordón espinal en dos hemicordones: derecho e izquierdo (figura

6.2).

En la porción lateral de la cara anterior se aprecia la emergencia de las raicillas anteriores, que convergen para formar las raíces anteriores. Entre la emergencia de las raicillas anteriores y el surco espinal anterior se encuentra el cordón anterior. En la porción lateral de la cara posterior se localiza la llegada de las raicillas posteriores, que provienen de las raíces posteriores. La región entre el surco espinal posterior y las raicillas posteriores corresponde al cordón posterior. La cara lateral del cordón espinal forma el cordón lateral, que se localiza entre las raicillas espinales ventrales y las dorsales (figura 6.2A).

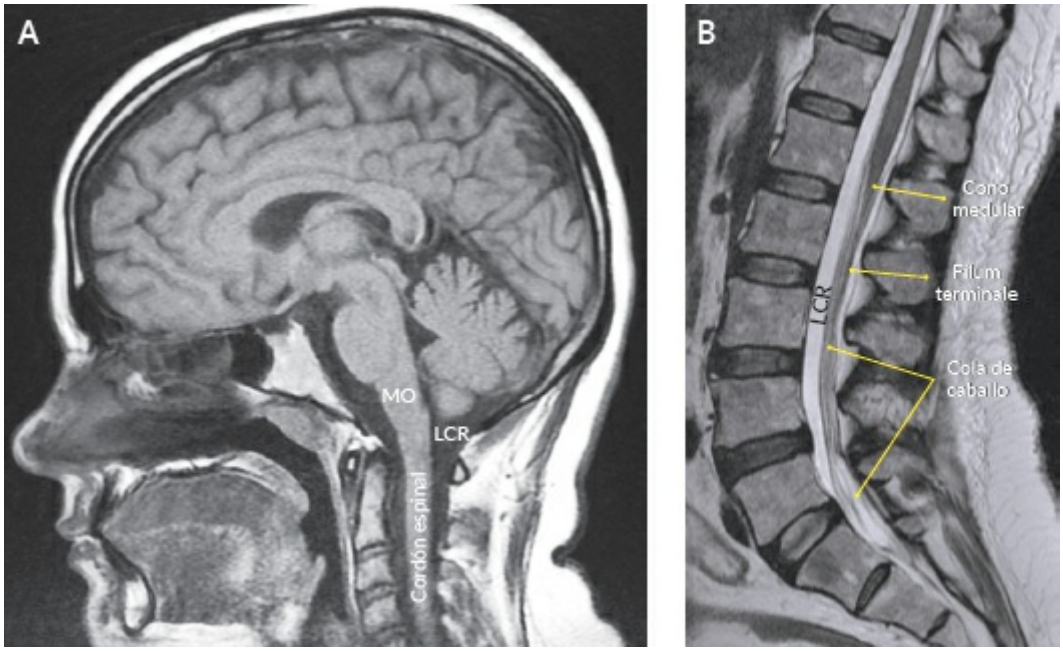


Figura 6.1A. IRM en T1 (T1–WI) de corte sagital encefálico en la que se aprecia la unión del cordón espinal con la médula oblongada (MO) a nivel del agujero magno. Nótese el espacio subaracnoideo con líquido cefalorraquídeo (LCR) que rodea al cordón espinal.

Figura 6.1B. IRM en T2 (T2–WI) de la porción lumbar de la columna vertebral. Las raíces nerviosas que acompañan el filum terminale constituyen la cola de caballo. Adelante, se observan los cuerpos vertebrales con los discos intervertebrales y atrás, las apófisis espinosas caracterizadas por su forma rectangular.

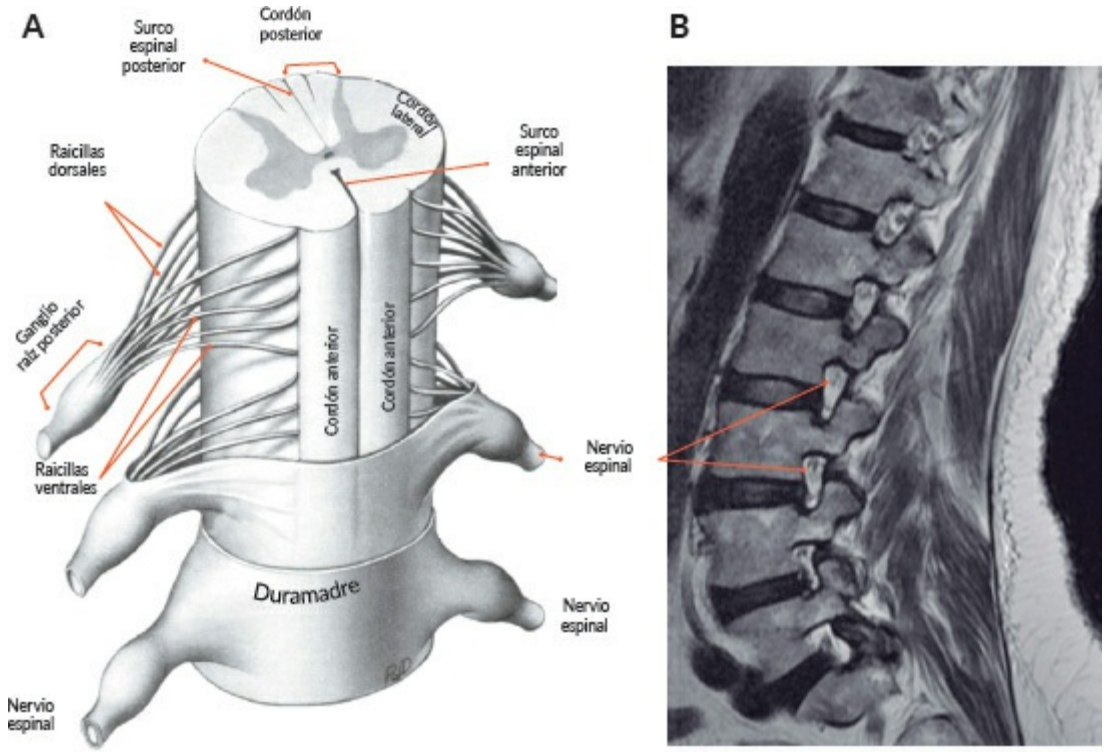


Figura 6.2A. Esquema del cordón espinal. **Fuente:** adaptada de (1).
Figura 6.2B. IRM en T2 (T2–WI) a la altura de los agujeros de conjunción.

En su porción más rostral (cervical), los cordones posteriores presentan un surco que los divide en dos segmentos: los fascículos grácil (medial) y cuneatus (lateral), que terminan en los tubérculos grácil y cuneatus a nivel de la cara posteroinferior de la médula (figura 6.3). Las raicillas ventrales y dorsales se presentan a lo largo de todo el cordón espinal. La unión de las raíces anteriores y posteriores forma los nervios espinales a nivel de los agujeros de conjunción (figura 6.2B). Las raíces anteriores o ventrales contienen fibras eferentes (motoras) somáticas y, en ciertos niveles, también fibras eferentes viscerales (simpáticas y parasimpáticas). Las fibras de estas raíces se originan en los núcleos motores del cordón espinal. Las raíces posteriores o dorsales contienen fibras aferentes somáticas y viscerales. Sus cuerpos neuronales se encuentran en los ganglios de las raíces posteriores, que se localizan cerca de la unión con las raíces anteriores (agujero de conjunción).

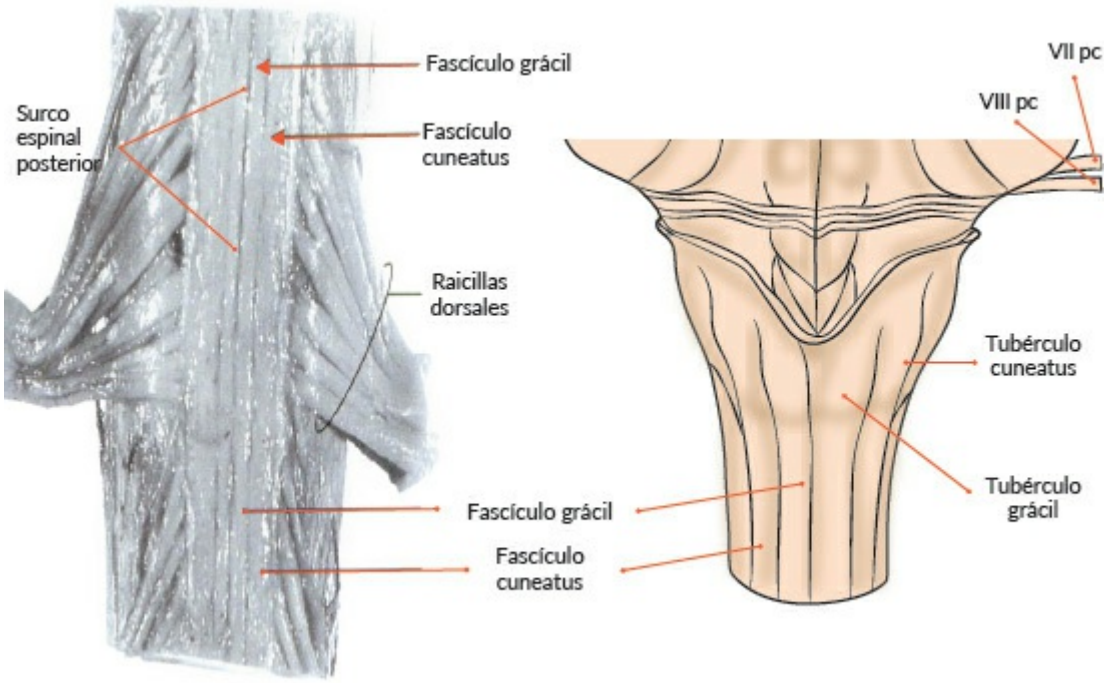


Figura 6.3A. Corte anatómico de la cara posterior del cordón espinal a nivel cervical. **Fuente:** adaptada de (2).
Figura 6.3B. Esquema del cordón espinal en el que se aprecia la terminación de los fascículos grácil y cuneatus.

La porción del cordón espinal que origina un par de nervios espinales constituye un segmento espinal. De manera que cada segmento espinal da lugar a cuatro grupos de raíces espinales —uno ventral y otro dorsal en ambos lados—, excepto el segmento C1, que no tiene raíces sensitivas o dorsales. En total, hay 31 segmentos espinales distribuidos así: 8 cervicales, 12 torácicos, 5 lumbares, 5 sacros y 1 coccígeo. Durante el desarrollo, cada nervio espinal guarda relación con un somita, de modo que los segmentos espinales están relacionados sistemáticamente con áreas específicas de piel, músculos y, en algunas ocasiones, hueso. Los elementos inervados por un segmento espinal constituyen un dermatoma (figura 6.4). Como ya se señaló, el cordón espinal presenta dos engrosamientos: el cervical y el lumbar. El cervical inerva las extremidades superiores y se extiende entre el tercer segmento cervical y el primero torácico (C3–T1). El lumbar, que inerva las extremidades inferiores, se extiende entre el primer segmento lumbar y el segundo sacro (L1–S2).

Cada segmento se relaciona con una vértebra. Por convención, los nervios espinales de la región cervical se extienden por encima de la vértebra que les corresponde. Los nervios espinales C1 se ubican entre la primera vértebra cervical y el cráneo, y los nervios C8, encima de la primera vértebra torácica. A partir del primer nervio espinal torácico (T1), los nervios espinales se despliegan por debajo de la vértebra que les corresponde. Dado que el cordón espinal llega hasta la primera vértebra lumbar (L1), las raíces lumbares, sacras y coccígeas descienden por el conducto raquídeo, alrededor

del filum terminale, hasta salir por los agujeros de conjunción que les corresponden. Este grupo de raíces constituye la denominada cauda equina o cola de caballo (figuras 6.4A y 6.5B). El amplio espacio subaracnoideo que está debajo de la segunda vértebra lumbar y que contiene solamente las raíces espinales y el filum terminale se conoce como cisterna lumbar. Por tales características, en este espacio se realiza la punción lumbar para extraer líquido cefalorraquídeo (figura 6.5).

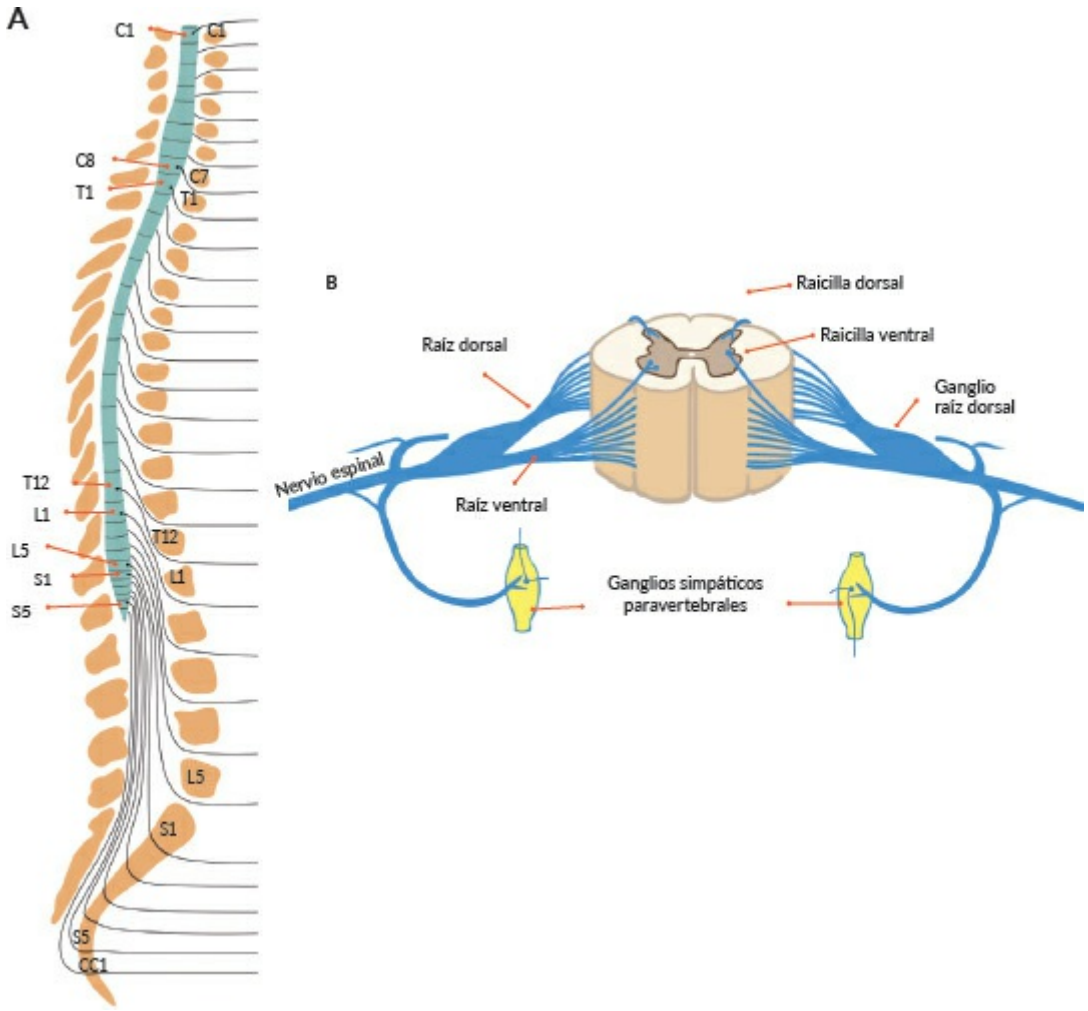


Figura 6.4A. Esquema de los segmentos del cordón espinal con sus raíces espinales y vértebras. Los cuerpos vertebrales están en la parte derecha de la figura y las apófisis espinosas en la parte izquierda.

Figura 6.4B. Esquema de un segmento espinal.

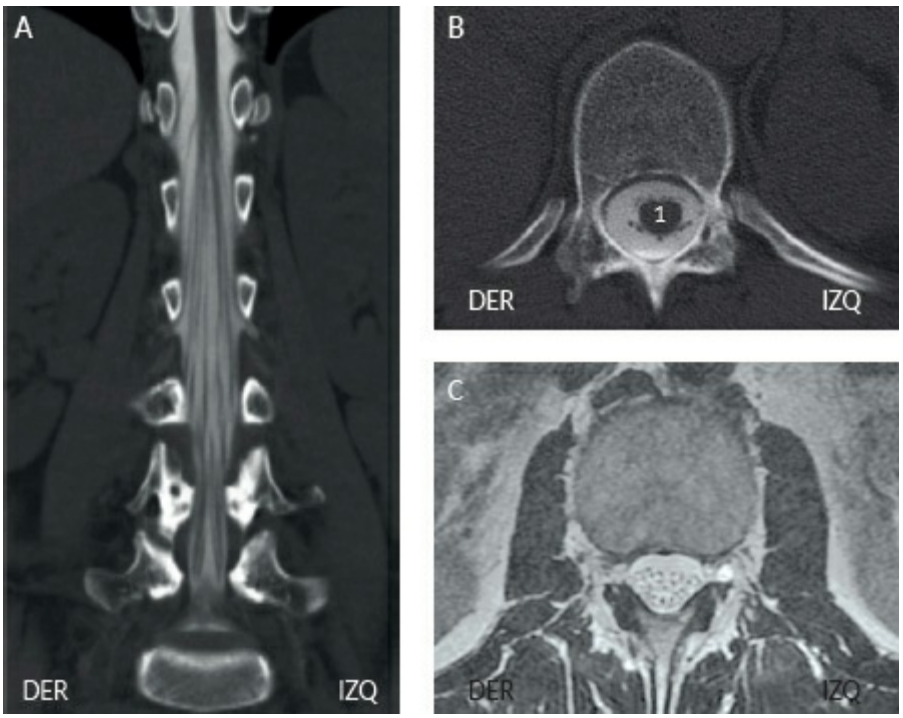


Figura 6.5A. Mielo–TAC de corte coronal lumbar en la que se aprecian las raíces espinales suspendidas en LCR que transcurren por la cisterna lumbar y forman la cola de caballo.
Figura 6.5B. Mielo–TAC de corte transversal lumbar en la que se observa el cordón espinal (1) y algunas raíces de la cola de caballo laterales al cordón.
Figura 6.5C. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal a nivel de la cauda equina en la que se identifican las raíces espinales, el filum terminale hacia atrás (más oscuro) y el LCR de la cisterna lumbar. A este nivel no se aprecia el cordón espinal.

CONFIGURACIÓN INTERIOR

Un corte transversal del cordón espinal permite identificar la sustancia gris con forma de H, en el centro del cordón y rodeada de sustancia blanca. El volumen y la forma de las sustancias gris y blanca cambian según la altura del corte pero guardan siempre la misma relación.

Sustancia gris

La sustancia gris está formada por dos porciones simétricas (derecha e izquierda) unidas en la mitad por la comisura gris, que contiene remanentes del conducto del epéndimo. La sustancia gris se extiende a lo largo de todo el cordón espinal y presenta tres grupos de prolongaciones (figura 6.6):

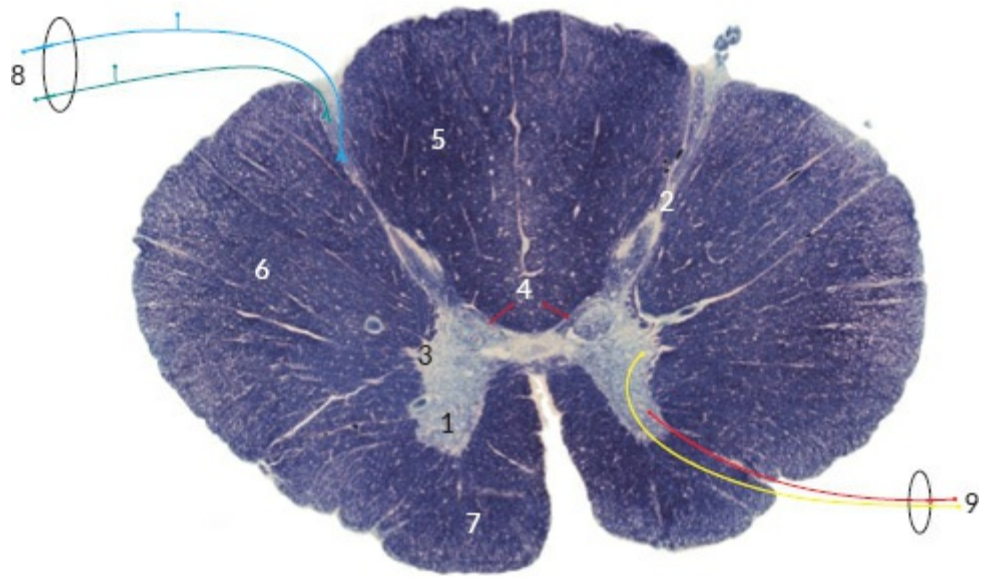


Figura 6.6. Corte transversal del cordón espinal a nivel de T–5. 1: cuerno o asta anterior; 2: asta posterior; 3: asta lateral o intermedio–lateral; 4: columna de Clarke; 5: cordón posterior; 6: cordón lateral; 7: cordón anterior; 8: raíces dorsales; 9: raíces ventrales.

Cuernos o astas anteriores (ventrales): se sitúan delante del canal y contienen motoneuronas alfa y gamma (motoneuronas inferiores) que originan las raíces anteriores. Las motoneuronas alfa inervan las fibras musculares estriadas, mientras que las motoneuronas gama, más pequeñas y menos numerosas, inervan las fibras intrafusales de los husos neuromusculares.

Cuernos o astas intermedio–laterales: corresponden a la porción de la sustancia gris ubicada entre las astas anteriores y las posteriores. Contienen neuronas preganglionares del sistema nervioso autónomo. Entre los segmentos T1 y L2, las neuronas preganglionares pertenecen al sistema simpático y sus fibras abandonan el cordón espinal a través de las raíces ventrales de estos segmentos. En los segmentos S2 y S4, las astas intermedio–laterales contienen neuronas preganglionares parasimpáticas, cuyas fibras abandonan el cordón espinal a través de las raíces ventrales sacras.

Cuernos o astas posteriores (dorsales): menos voluminosas que las astas anteriores, reciben las fibras que provienen de las raíces posteriores. Un fascículo compacto llamado fascículo dorsolateral o tracto de Lissauer se localiza en la porción posterior de las astas posteriores y corresponde a las fibras aferentes que traen información nociceptiva o de dolor. Al penetrar en el cordón espinal, estas fibras se bifurcan para formar tractos ascendentes y descendentes (tracto de Lissauer), cuyas ramas penetran en las astas posteriores.

En 1952, estudiando el cordón espinal de gatos, el neuroanatomista sueco Bror Rexed implementó un sistema para la subdivisión de la sustancia gris en

capas o láminas con base en las características citoarquitectónicas. Desde entonces, el mismo sistema se ha aplicado para analizar el cordón espinal de otros mamíferos, incluyendo al ser humano. La sustancia gris se divide en diez capas numeradas de i a x. Detrás de la capa i se localiza la zona de Lissauer, que corresponde a fibras mielinizadas y no mielinizadas que penetran en el cordón espinal (figura 6.7).

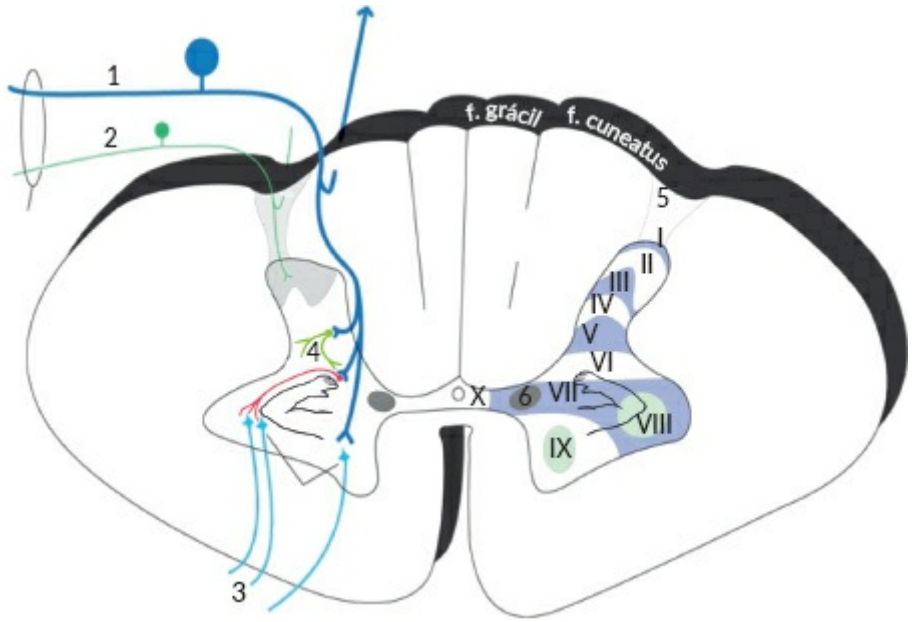


Figura 6.7. Esquema de las láminas de Rexed de la sustancia gris. Las fibras aferentes muy mielinizadas (1) penetran mediales en el cordón posterior, mientras que las de diámetro pequeño (2) lo hacen de forma lateral. 3: raíces ventrales; 4: interneuronas; 5: tracto de Lissauer; 6: núcleo de Clarke. **Fuente:** adaptada de (2).

La capa i, también conocida como zona marginal, es la porción más posterior de las astas posteriores y cubre la capa ii o sustancia gelatinosa. Muchas de las fibras originadas en la capa i hacen parte del fascículo o haz espinotalámico contralateral, que transporta información de dolor y temperatura. En la capa ii o sustancia gelatinosa, se encuentra gran cantidad de interneuronas inhibitorias, que participan en los mecanismos de inhibición del dolor. La sustancia P, un neuropéptido que media información para el dolor, se encuentra en altas concentraciones en las láminas i y ii. Las láminas iii a vi conforman el cuerpo de las astas posteriores y contienen —especialmente la capa IV— una alta concentración de fibras mielinizadas. De estas capas se desprenden fibras cuyos axones forman el haz espinotalámico contralateral. Las láminas iii y iv constituyen el núcleo proprius. Las fibras que terminan en estas capas traen información de posición y tacto superficial.

La lámina v contiene neuronas que responden a estímulos nociceptivos y la capa vi, neuronas que responden a signos mecánicos de las articulaciones y la piel. La lámina vii corresponde a la zona intermedia, localizada entre los segmentos T1–L2, y contiene neuronas preganglionares simpáticas. Una

lámina similar se encuentra entre los segmentos S2–S4 y contiene neuronas preganglionares parasimpáticas. En la porción dorsomedial de esta lámina se distingue el núcleo de Clarke, localizado entre los segmentos C8–L3. Al núcleo de Clarke le llegan fibras provenientes, en su mayoría, de los husos musculares y, en menor cantidad, del órgano tendinoso de Golgi, localizado en la unión del músculo con el tendón. Los axones que nacen en el núcleo de Clarke forman el tracto espinocerebeloso dorsal o posterior

Las láminas VIII y IX son grupos de motoneuronas (alfa y gamma) ubicados en las porciones medial y lateral de las astas anteriores. Estos grupos están somatotópicamente organizados, de tal manera que las motoneuronas de la porción medial inervan la musculatura axial, mientras que las motoneuronas de la porción lateral inervan la musculatura distal de las extremidades. Las neuronas que controlan los músculos proximales de las extremidades se localizan entre estos dos grupos. En general, los músculos flexores se representan hacia la región medial y los extensores, hacia la región lateral de las astas anteriores. La capa X es la zona de sustancia gris que rodea el conducto del epéndimo. Esta diferenciación en láminas o capas resulta apropiada, ya que las diferencias histológicas de las capas corresponden con las diferencias funcionales.

Dos columnas de motoneuronas localizadas en las astas anteriores se describen como elementos independientes de las capas mencionadas. Una columna es el núcleo accesorio espinal, que se extiende desde la porción inferior de la médula hasta el segmento C5. Los axones de estas neuronas motoras emergen por el cordón lateral, detrás del ligamento dentado, ascienden a través del agujero magno y forman parte del nervio accesorio (par craneano XI). La otra columna independiente es el núcleo del nervio frénico, cuyas motoneuronas inervan el diafragma y se localizan en la porción medial de las astas anteriores, en los segmentos C3–C5.

Sustancia blanca

La sustancia blanca rodea la sustancia gris y se organiza en tres cordones o columnas: los cordones posteriores o dorsales, los laterales, y los anteriores o ventrales. Los cordones posteriores se ubican entre el surco espinal posterior y las astas posteriores. En su porción cervical, estos cordones contienen los fascículos grácil y cuneatus. Los cordones anteriores se sitúan entre el surco espinal anterior y las astas anteriores, y los cordones laterales, entre las astas anteriores y posteriores. Las fibras nerviosas de los cordones forman fascículos o tractos que tienen una función común y pueden ser de tres tipos:

Fascículos ascendentes: se proyectan al tálamo, al cerebelo y a los núcleos del tronco cerebral.

Fascículos descendentes: provienen de la corteza cerebral o de los núcleos del tronco cerebral.
Fascículos propioespinales o espinoespinales: interconectan varios segmentos del cordón espinal, usualmente adyacentes a la sustancia gris.

Fascículos ascendentes

Sistema anterolateral de tractos: constituido por los tractos espinotalámicos ventrolaterales y los tractos adyacentes (espinorreticular y espinomesencefálico) (figura 6.8). Estos tractos llevan información de dolor, temperatura y tacto superficial. Las neuronas que forman este sistema se originan en las astas posteriores, se cruzan por delante del conducto del epéndimo (comisura anterior) y ascienden por los cordones anterior y lateral contralaterales. Las fibras que llevan información de la extremidad inferior se localizan en la porción posterolateral, mientras que las que llevan información de la extremidad superior se sitúan en la porción ventromedial del tracto. Las fibras espinotalámicas terminan en el núcleo ventral posterolateral del tálamo, las que forman el tracto espinorreticular, en la formación reticular del tronco cerebral, y las que forman el tracto espinomesencefálico, en la sustancia gris periacueductual del mesencéfalo.
Cordones posteriores: están formados por fibras periféricas que llevan información propioceptiva (sentido de posición, movimiento de las articulaciones) y sentido de vibración de las extremidades y el tronco. Las fibras que llevan información de las extremidades inferiores y el tronco ascienden por todo el cordón espinal en disposición ipsolateral y forman los fascículos gráciles. Las fibras que provienen de las extremidades superiores y la nuca se localizan lateralmente y forman los fascículos cuneatus (figura 6.8). Las fibras de estos fascículos terminan en los tubérculos grácil y cuneatus de la médula.
Tracto espinocerebeloso posterior (haz ec. dorsal): se localiza en la superficie lateral del cordón lateral. Sus fibras se proyectan al vermis del cerebelo a través del pedúnculo cerebeloso inferior ipsolateral. El haz ec. dorsal se forma de fibras propioceptivas que provienen del núcleo de Clarke y lleva información proveniente del tronco y la extremidad inferior del mismo lado. Este tracto provee información al cerebelo acerca de la posición y movimiento de grupos musculares. Como el ser humano no es consciente de esta información, a este tipo de propiocepción se le denomina propiocepción no consciente. Con esta información, el cerebelo tiene la capacidad de coordinar e integrar información del movimiento de las extremidades inferiores para la postura. El tracto espinocerebeloso rostral lleva información similar pero proveniente de la extremidad superior.

Tracto espinocerebeloso anterior (haz ec. ventral): transporta información proveniente de la extremidad inferior, pero difiere del tracto espinocerebeloso posterior en que sus fibras provienen de los órganos tendinosos de Golgi, de receptores cutáneos, de interneuronas espinales y de tractos descendentes. El haz ec. ventral recibe información contralateral y asciende hasta el pedúnculo cerebeloso superior, donde se cruza de nuevo para terminar en el vermis cerebeloso del lóbulo anterior. Este tracto también está relacionado con la propiocepción no consciente.

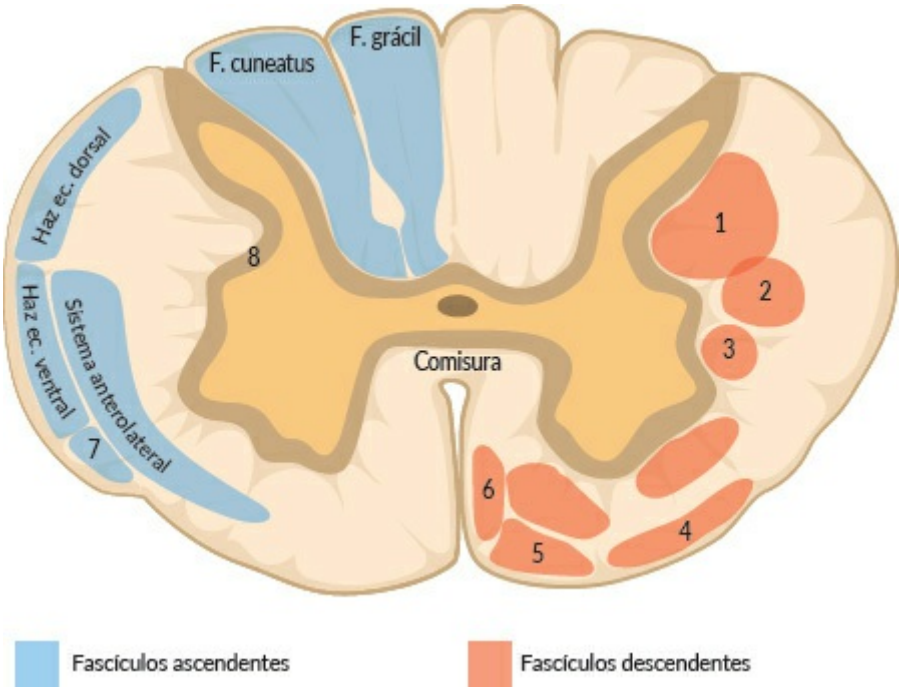


Figura 6.8. Esquema de los principales fascículos que constituyen la sustancia blanca del cordón espinal. 1: Haz corticoespinal lateral; 2: tracto rubroespinal; 3: fibras autonómicas descendentes; 4: haz vestibuloespinal; 5: haz tectoespinal; 6: haz corticoespinal ventral; 7: tracto espinoolivar; 8: fascículo proprii. **Fuente:** adaptada de (3).

Fascículos descendentes

La mayoría de los fascículos descendentes influyen sobre la actividad de las motoneuronas inferiores. Entre estos se encuentran:

Haz corticoespinal o vía piramidal: se origina en el giro precentral de la corteza motora primaria y termina en las astas anteriores. La mayoría de sus fibras se cruzan a nivel de la médula para formar el haz o tracto corticoespinal lateral (vía piramidal lateral). Las fibras que no se cruzan forman el tracto corticoespinal anterior o ventral (vía piramidal anterior), cuyas fibras se cruzan a nivel del cordón espinal en el segmento que les corresponde. **Haz rubroespinal:** está adyacente al haz corticoespinal lateral. Sus fibras provienen del núcleo rojo contralateral y terminan en el

cordón espinal haciendo sinapsis con interneuronas que, a su vez, se proyectan a las motoneuronas del asta anterior. Al parecer, este fascículo es responsable de los movimientos de flexión de las extremidades superiores.

Tractos vestibuloespinal, reticuloespinal y tectoespinal: descienden cercanos al tracto corticoespinal anterior. Estos fascículos intervienen en el control de la musculatura axial, la postura, el balance y los movimientos de la cabeza.

Fibras autonómicas descendentes: a diferencia del haz corticoespinal lateral, que está densamente empaquetado y se identifica fácilmente en los cortes, estas fibras están diseminadas cerca al cuerno lateral o intermedio lateral. Provienen del hipotálamo, la ínsula, el complejo amigdalino y otras estructuras límbicas. Las fibras simpáticas que conforman este fascículo terminan en el cuerno intermedio lateral del mismo lado, en los segmentos torácicos y primeros lumbares. Allí, hacen sinapsis con las neuronas simpáticas preganglionares, que abandonan el cordón espinal por las raicillas anteriores.

Fascículo proprii: contiene fibras ascendentes y descendentes (cruzadas y directas) que nacen y terminan en el cordón espinal, conectando diferentes segmentos espinales. Este fascículo media reflejos intrínsecos que intervienen en la coordinación de los movimientos de las extremidades.

Ejercicios clínicos

Caso 1

Un paciente de 73 años con antecedentes de cáncer pélvico presenta síntomas neurológicos que comprometen las extremidades inferiores y los esfínteres. Se realiza IRM de la región lumbar (figura 6.9). ¿Qué hallazgo anormal observa?, ¿cuáles raíces y segmentos espinales están comprometidos?

Figura 6.9. IRM en T2 (T2–WI) que muestra la cisterna lumbar, la cauda equina y las vértebras lumbares.

Caso 2

Una paciente de 35 años presenta desde hace una semana alteraciones en la marcha. Se realiza IRM cervical (figura 6.10). ¿A nivel de cuál vertebra y segmento espinal se presenta la lesión?, ¿qué fascículos compromete?

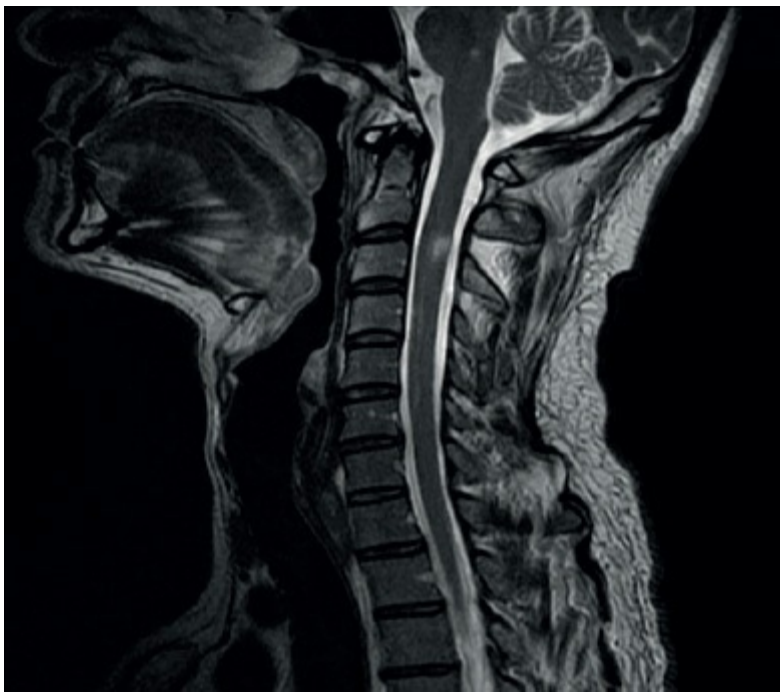


Figura 6.10. IRM en T2 (T2–WI) de la región cervical que muestra una lesión hiperintensa en el cordón espinal.

Caso 3

Una paciente de 22 años llega a consulta por dolor en la pierna izquierda que le impide moverse. El dolor se inicia en la región lumbar y se irradia hacia el pie izquierdo. Se realiza IRM de la region lumbar (figura 6.11). ¿Qué observa?, ¿qué raíz se compromete?

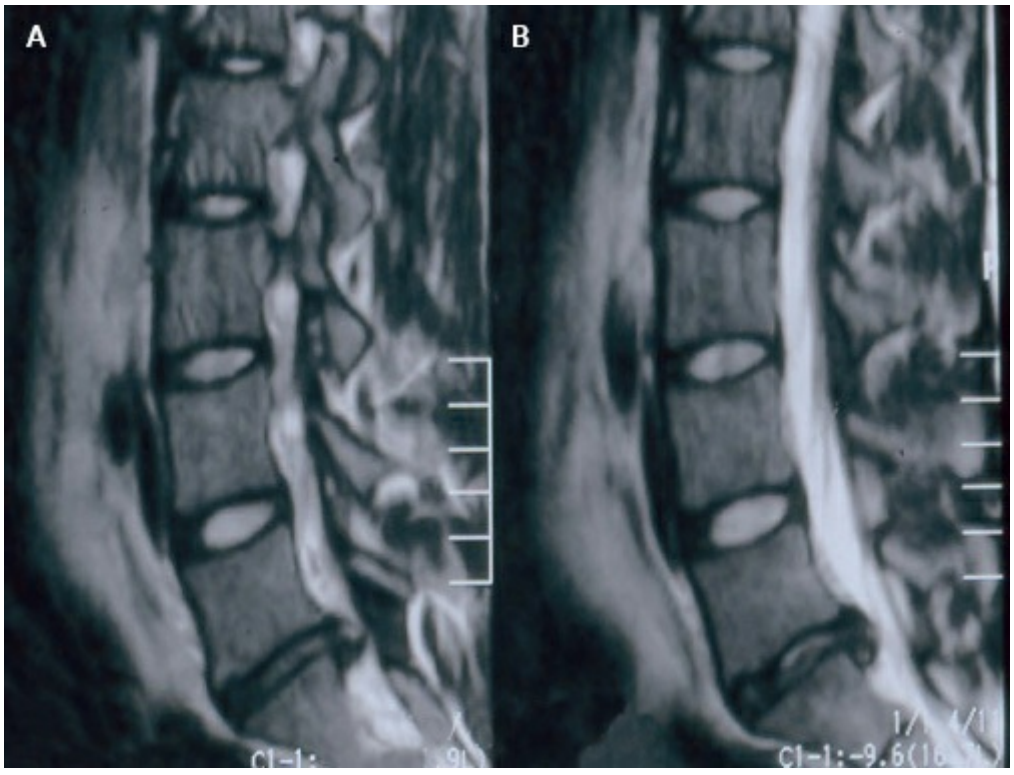


Figura 6.11. IRM en T2 (T2–WI) de la región lumbar en corte parasagital (A) y sagital (B).

Caso 4

Un paciente de 23 años acusa dolor severo en la región cervical que se irradia a ambos brazos. Se toma una IRM de la región cervical (figura 6.12). ¿A nivel de cuál segmento cervical se encuentra la lesión?, ¿considera que la lesión se localiza a nivel del conducto del epéndimo?

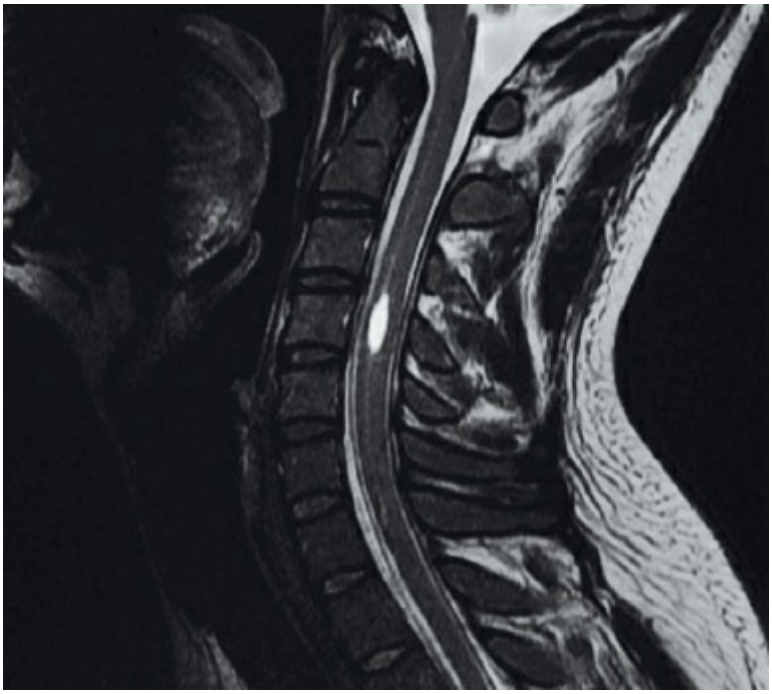


Figura 6.12A. IRM en T2 (T2–WI) de la región cervical en corte sagital.

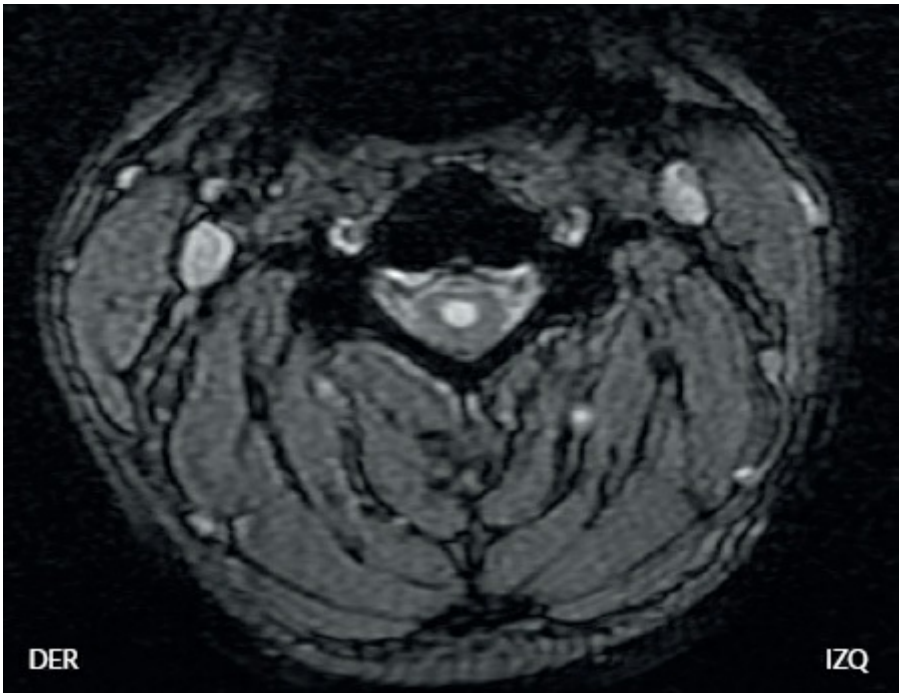


Figura 6.12B. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal a nivel de la lesión que se observa en la imagen anterior.

Caso 5

Un paciente de 57 años acusa dolor cervical, pérdida progresiva de la fuerza en miembros inferiores (paraparesia) y alteración en el control del esfínter vesical. Se toma IRM cervical (figura 6.13). ¿Qué observa en las imágenes?, ¿se relacionan estos hallazgos con el cuadro clínico del paciente?

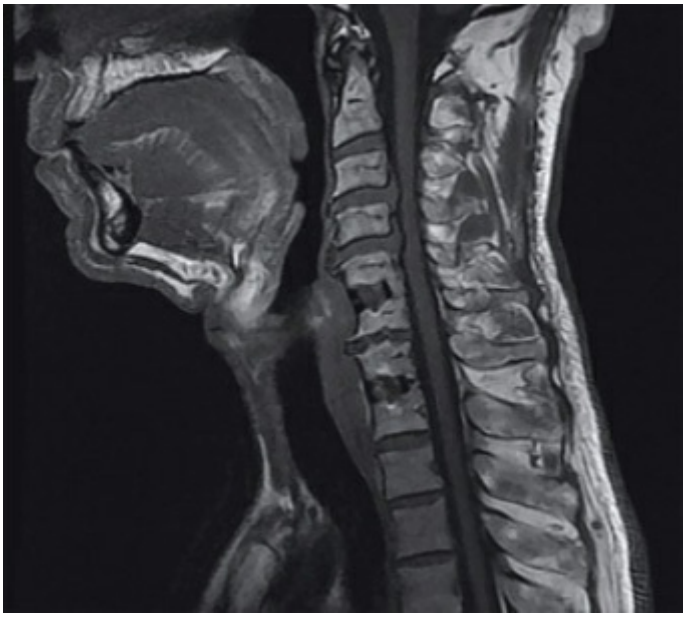


Figura 6.13A. IRM en T2 (FLAIR) de corte sagital a nivel cervical.

Figura 6.13B. IRM en T2 (T2–WI) de corte sagital a nivel cervical.

Respuestas

Caso 1: la IRM muestra compromiso de los cuerpos vertebrales y de la cola de caballo. Esto se conoce como síndrome de la cauda equina. Los segmentos lumbares y sacros estarán comprometidos.
Caso 2: la IRM señala lesión hiperintensa en los cordones posteriores a nivel de C3 que compromete los fascículos grácil y cuneatus.
Caso 3: la IRM muestra protrusión del disco intervertebral a nivel de L5–S1. La raíz que se compromete es L5.
Caso 4: la IRM señala lesión quística a nivel del conducto del epéndimo.
Caso 5: la IRM muestra estenosis significativa del canal cervical entre C3 y C5 con extrusiones discales C3–C4 y C4–C5 que comprimen el cordón espinal. Los espacios intervertebrales en C5–C6 y C7–T1 están en posición adecuada. Los hallazgos de las imágenes se correlacionan con el cuadro clínico del paciente.

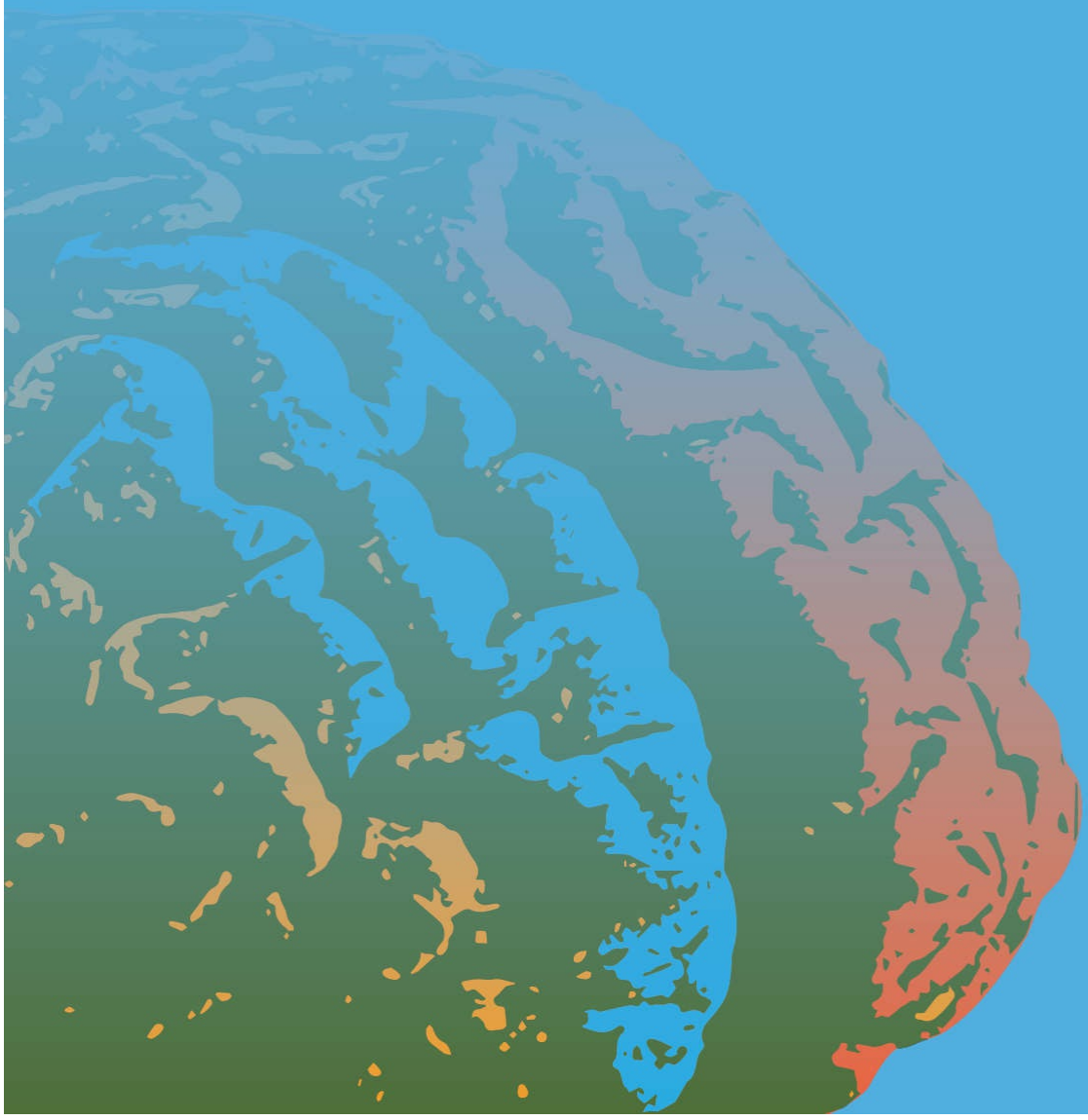
REFERENCIAS

1. Carpenter MB. Core text of neuroanatomy. 2.ª ed. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins; 1978.
2. Nolte J. The human brain: an introduction to its functional anatomy. 6.ª ed. St. Louis: Mosby/Elsevier; 2009.
3. Waxman SG. Clinical neuroanatomy. 27.ª ed. New York: McGraw–Hill; 2013.

LECTURAS RECOMENDADAS

1. Siegel A, Sapru H. Essential neuroscience. 2.ª ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2009.
2. Heimer L. The human brain and spinal cord. Functional neuroanatomy and dissection guide. 2.ª ed. New York: Springer–Verlag; 1995.
3. Kiernan JA. Barr´s the human nervous system. An anatomical viewpoint. 9.ª ed. Wolters Kluwer Health, Lippincott Williams & Wilkins; 2009.
4. Cho TA. Spinal cord functional anatomy. Continuum (Minneap Minn). 2015; 21(1):13–35.

CAPÍTULO 7



CIRCULACIÓN DEL ENCÉFALO Y DEL CORDÓN ESPINAL

CIRCULACIÓN ARTERIAL DEL ENCÉFALO

El sistema vascular del encéfalo es único y heterogéneo en cuanto a su estructura, organización microvascular y función. Por ejemplo, hay mayor cantidad de capilares en las regiones corticales y núcleos que en la sustancia blanca. La mayoría de los vasos del sistema nervioso poseen células endoteliales con uniones muy firmes, lo que dificulta el paso de moléculas solubles en agua a menos que exista una interacción con sistemas especializados de transporte. Este fenómeno fue descubierto por Paul Ehrlich en 1885. Otras áreas del sistema nervioso tienen mayor permeabilidad vascular, lo que crea microambientes dentro del tejido nervioso y permite que los constituyentes vasculares accedan con más facilidad a las neuronas. Una de las características del sistema nervioso central es la ausencia de drenaje linfático, si bien estudios recientes han descubierto vasos linfáticos funcionales alrededor de los senos venosos durales.

La circulación arterial que irriga el encéfalo se suele dividir en dos grupos: la circulación anterior, conformada por las dos arterias carótidas internas y sus ramas, y la circulación posterior, compuesta por el tronco vertebrobasilar y sus ramas. Ambos grupos arteriales provienen de ramas del arco aórtico. El tronco braquiocefálico se deriva de la convexidad de la arteria aorta, que da origen a la arteria subclavia derecha y a la arteria carótida común o primitiva derecha. En el lado izquierdo, la arteria carótida común y la subclavia se originan de la aorta de forma independiente (figura 7.1). Las arterias vertebrales se originan de las arterias subclavias, se dirigen hacia atrás hasta alcanzar el agujero transverso de la sexta vértebra cervical, ascienden hasta el agujero transverso del atlas, se extienden en dirección anteromedial, perforan la membrana atlantooccipital y penetran a la cavidad craneana por el agujero magno.

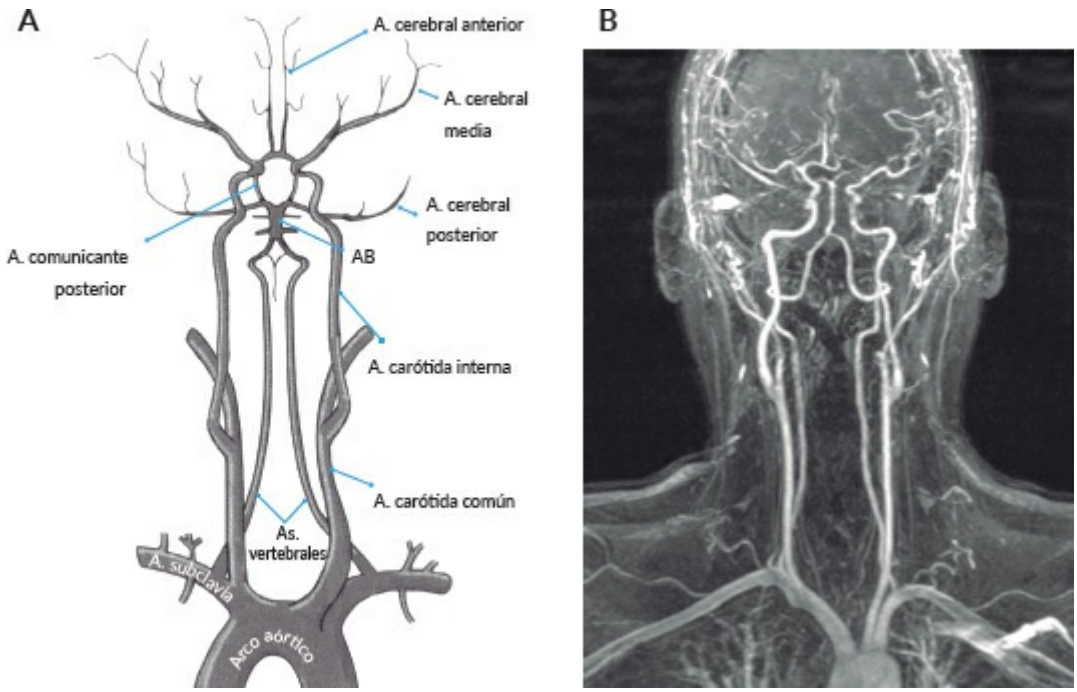


Figura 7.1A. Esquema del arco aórtico y la circulación anterior y posterior del encéfalo. AB: arteria basilar.
Figura 7.1B. Angiografía de resonancia magnética en la que se aprecian los principales vasos de la aorta y las arterias cerebrales señaladas en la figura anterior.

Circulación anterior

Las arterias carótidas comunes se bifurcan en carótidas externas e internas a nivel del hueso hioides. A la altura de la bifurcación de las arterias carótidas internas (ACI) se encuentran los cuerpos carotídeos (quimiorreceptores) y los senos carotídeos (barorreceptores). Las ACI (derecha e izquierda) cursan por detrás de la faringe, no originan ramas significativas en la zona cervical y penetran al cráneo por el conducto carotídeo, que se halla en posición medial y anterior respecto al agujero yugular en la base del cráneo (figuras 7.2 y 7.3). Las ACI transcurren por la porción petrosa del hueso temporal y forman una curva en S. Al ingresar a la cavidad craneana, atraviesan los senos cavernosos que se encuentran a lado y lado de la silla turca y salen a la altura de las apófisis clinoides anteriores. La curva en S se conoce también como sifón carotídeo y tiene tres porciones: intrapetrosa, intracavernosa y supraclinoides (figura 7.2).

La porción petrosa genera pequeñas ramas que irrigan el tímpano y el nervio vidiano. A nivel de la porción supraclinoidea, de la pared anterior de cada ACI se desprende una arteria oftálmica que irriga la retina (arteria central de la retina) y otras estructuras del globo ocular y la cavidad orbitaria. Las arterias comunicantes posteriores y coroideas anteriores también se originan de la pared posterior de las ACI y cursan en dirección posterior. Entre la arteria oftálmica y la arteria comunicante posterior nacen pequeños vasos

que suplen la porción anterior del infundíbulo y las arterias hipofisarias superiores e inferiores. La arteria comunicante posterior se une a la arteria cerebral posterior (ACP) y, en su recorrido, genera ramas que perforan el hipotálamo, el tálamo y el hipocampo.

La arteria coroidea anterior es una delgada arteria que irriga el tracto óptico, el plexo coroideo en el cuerno inferior (temporal) y otras estructuras profundas como el brazo posterior de la cápsula interna, la porción ventral del tálamo, los cuerpos geniculados laterales, el hipocampo y la amígdala. La bifurcación de las arterias carótidas internas —denominada porción en T— origina las arterias cerebrales anteriores (ACA), que cursan medialmente, y las arterias cerebrales medias (ACM), que cursan lateralmente (figura 7.4).

La arteria cerebral anterior (ACA) es una de las ramas terminales de la arteria carótida interna. Se dirige hacia delante hasta alcanzar el surco interhemisférico, donde se anastomosa con la arteria cerebral anterior contralateral a través de la arteria comunicante anterior (figura 7.4).

El segmento de la ACA comprendido entre la ACI y la arteria comunicante anterior se denomina A1. En el segmento A1 (precomunicante), la ACA origina ramas perforantes que suplen la porción anterior del hipotálamo, la región septal y la porción anterior y medial del estriado. La arteria de Heubner (recurrente) nace a nivel de la arteria comunicante anterior y sus ramas penetran por la sustancia perforada anterior e irrigan el brazo anterior de la cápsula interna, el putamen anterior y el caudado. Algunas de sus ramas se anastomosan con ramas perforantes de la arteria cerebral media. A partir de la arteria comunicante anterior, la ACA se dirige hacia la rodilla del cuerpo calloso (segmento A2), la rodea (segmento A3) y deriva en ramas corticales que irrigan el lobulillo frontal interno (arteria frontopolar), la circunvolución del cíngulo, el lobulillo paracentral, el lobulillo cuadrilátero, el septum lúcido y el cuerpo calloso (figura 7.5).

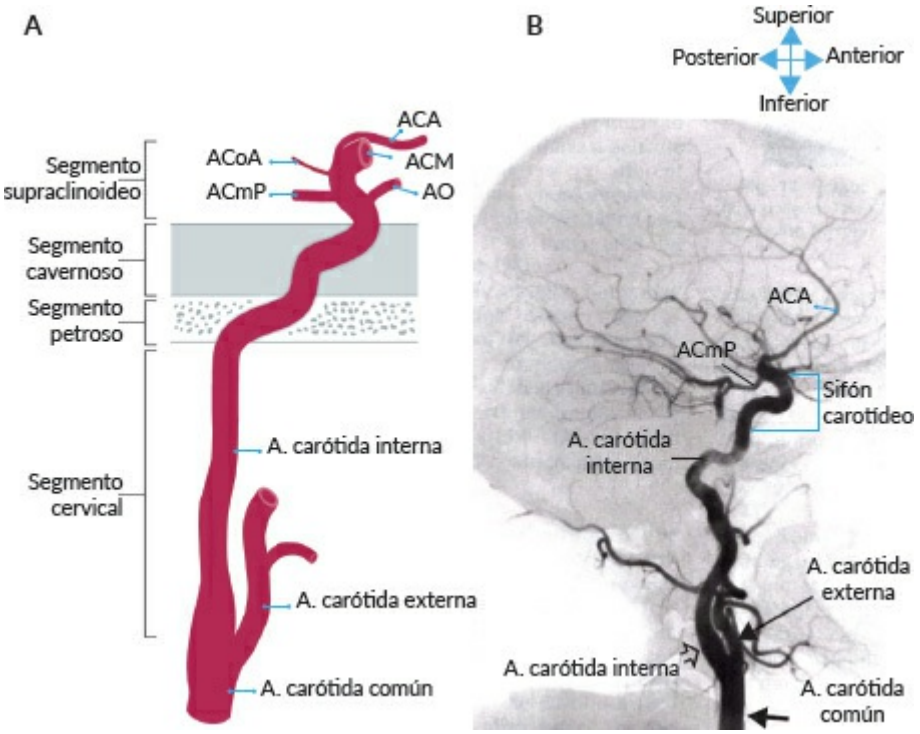


Figura 7.2A. Esquema de vista lateral de arteria carótida interna con sus ramas principales. AO: arteria oftálmica; ACmP: arteria comunicante posterior; ACoA: arteria coroidea anterior; ACM: arteria cerebral media; ACA: arteria cerebral anterior.

Figura 7.2B. Arteriografía convencional en proyección lateral de arteria carótida interna.

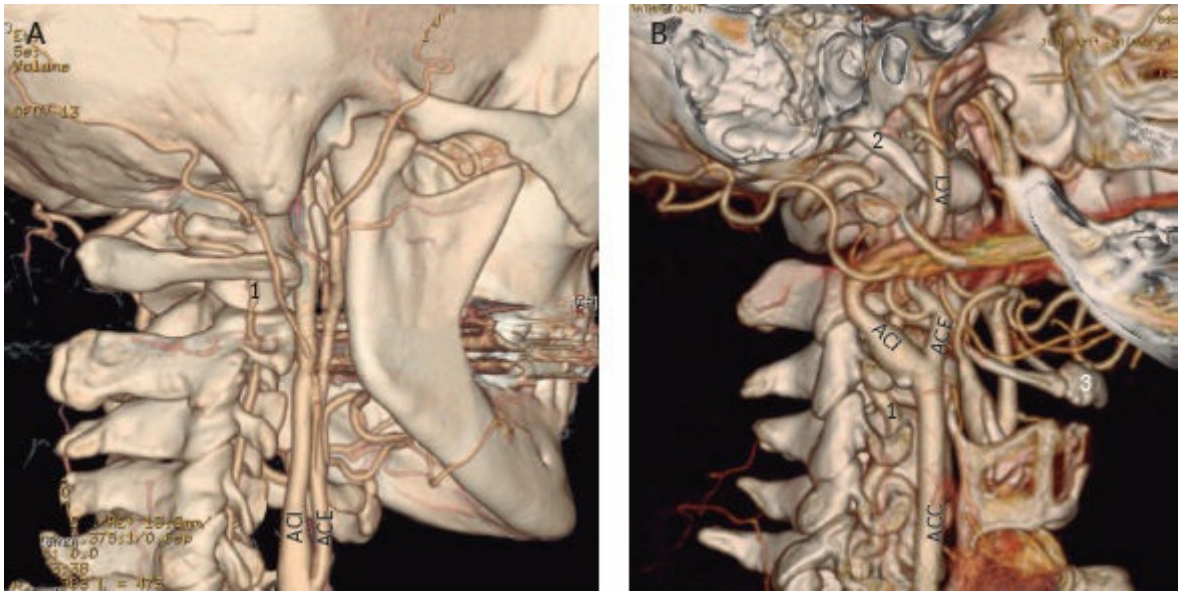


Figura 7.3A. Imagen de angio–TAC que muestra la bifurcación de la arteria carótida común (ACC). ACI: arteria carótida interna; ACE: arteria carótida externa; 1: arteria vertebral.

Figura 7.3B. Imagen de angio–TAC que muestra el ascenso de la arteria carótida común (ACC). 1: arteria vertebral; 2: apófisis estiloides; 3: hueso hioides.

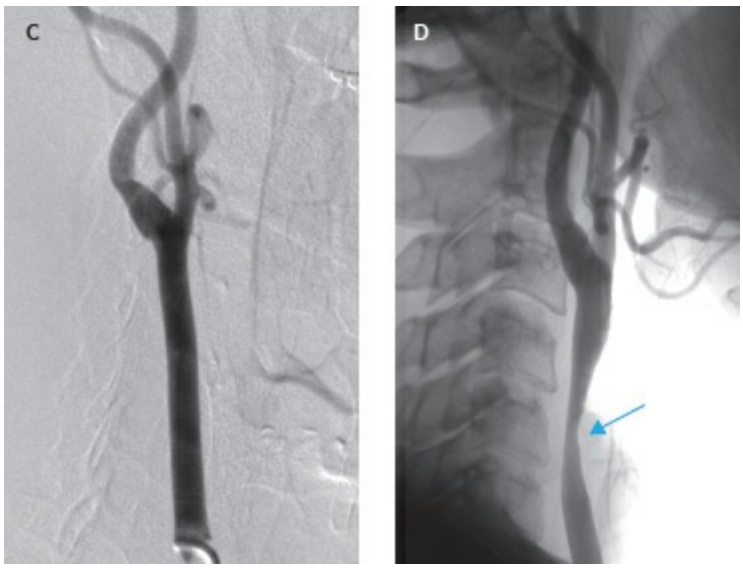


Figura 7.3C. Arteriografía de la arteria carótida derecha con aspecto normal.
Figura 7.3D. Arteriografía de la arteria carótida izquierda con disminución de la luz arterial (▶).
Estas imágenes corresponden a un paciente de 63 años que presentaba episodios de afasia transitorios. La figura D permite observar disminución de la luz arterial (estenosis) en la carótida izquierda, lo que ocasionaba los síntomas ya referidos. El paciente se intervino quirúrgicamente y permanece asintomático desde entonces.

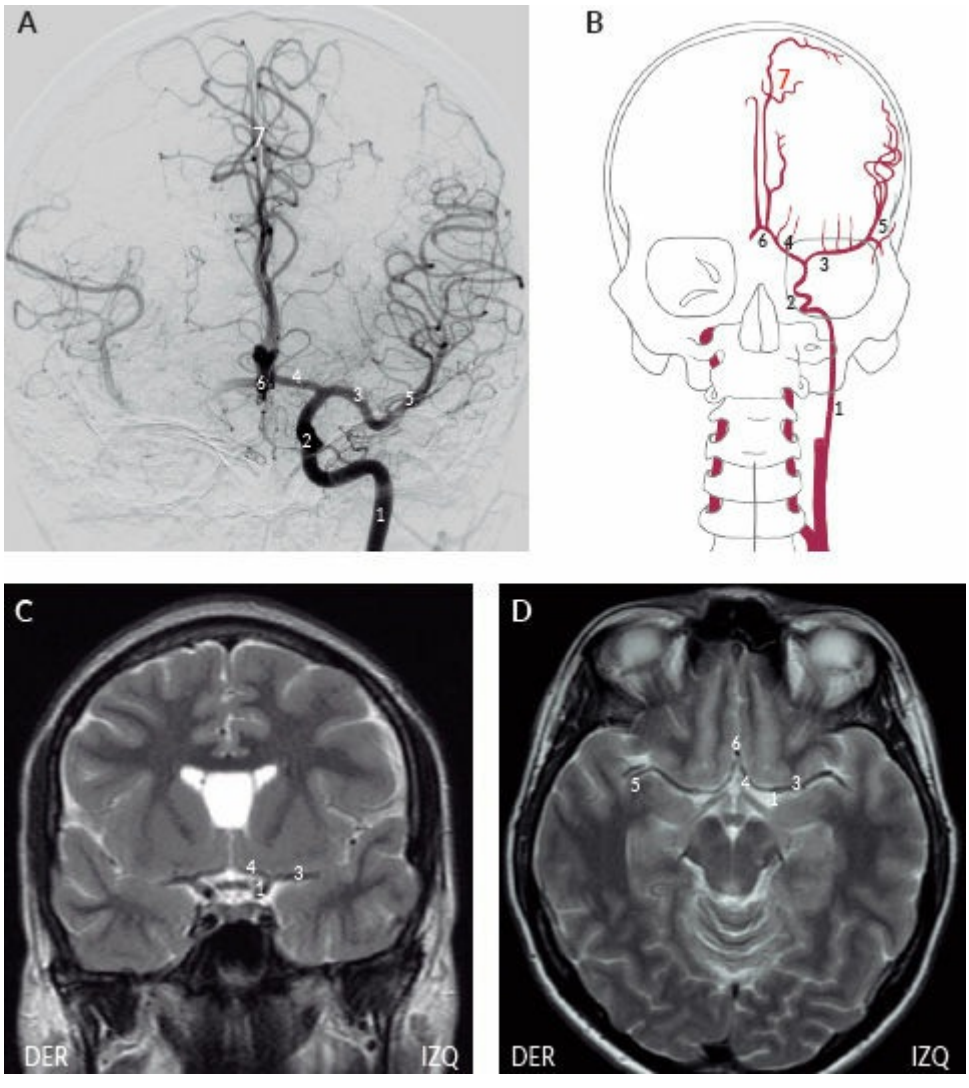


Figura 7.4A. Arteriografía de vista coronal que muestra la distribución de las ramas terminales de la carótida interna. 1: arteria carótida interna; 2: sifón carotídeo; 3: segmento M1; 4: segmento A1; 5: segmento M2; 6: arteria comunicante anterior; 7: continuación de la arteria cerebral anterior en la línea media.
Figura 7.4B. Esquema que muestra las mismas estructuras de la figura anterior.
Figura 7.4C. IRM en T2 (T2–WI) de corte coronal que muestra algunas estructuras de la figura A.
Figura 7.4D. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal que muestra algunas estructuras de la figura A.

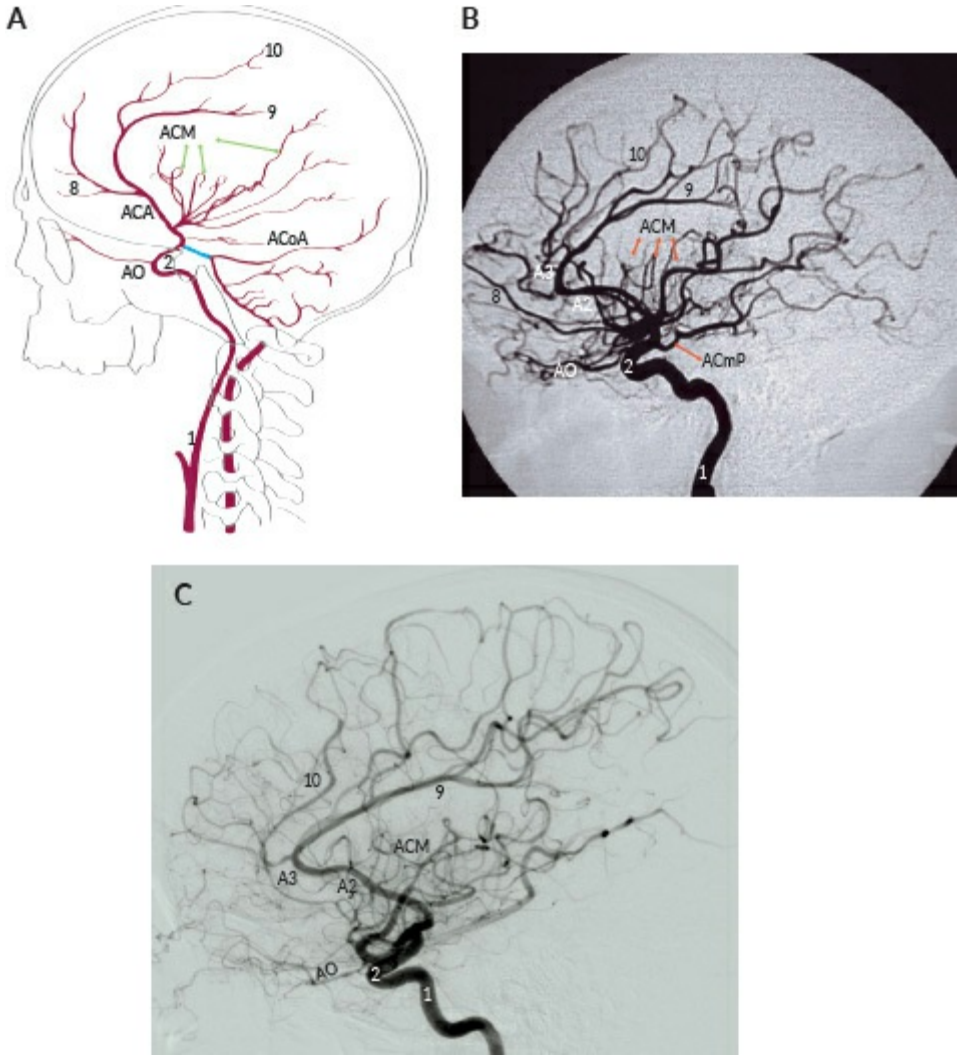


Figura 7.5A. Esquema de vista lateral de la circulación anterior y posterior. 1: arteria carótida interna; 2: sifón carotídeo; AO: arteria oftálmica; ACA: arteria cerebral anterior; 8: arteria frontopolar; 9: arteria pericallosa; 10: arteria callosomarginal; línea azul: arteria comunicante posterior; AcoA: arteria coroidea anterior; ACM: arteria cerebral media.
Figura 7.5B. Arteriografía de vista lateral de las arterias señaladas en la figura anterior. ACmP: arteria comunicante posterior.
Figura 7.5C. Arteriografía de vista lateral de las arterias señaladas en la figura A.

La arteria cerebral media (ACM) se considera la continuación o rama principal de la ACI. Tras desprenderse de esta, la ACM cursa por el surco lateral (segmento M1) y, en su porción distal, se trifurca en la división superior, la división inferior —que constituyen el segmento M2— y las ramas corticales temporales anteriores. En su trayecto proximal (M1), origina ramas

perforantes denominadas arterias lenticuloestriadas (mediales y laterales), que atraviesan la sustancia perforada anterior e irrigan la porción lateral del núcleo caudado y el putamen. La zona anterior y medial de estos núcleos está irrigada por ramas de la ACA y de la arteria recurrente. Las ramas corticales de la división superior suplen la cara lateral de los hemisferios cerebrales, por encima del surco lateral, y las ramas corticales de la división inferior suplen la cara lateral del lóbulo temporal y parte del lóbulo parietal, por debajo del surco lateral. Las ramas temporales anteriores irrigan el polo temporal y parte de la cara lateral del lóbulo temporal, y originan ramas corticales que irrigan el lóbulo orbitofrontal. Las ramas corticales de la ACM se anastomosan con ramas de las arterias cerebral anterior y cerebral posterior (figura 7.4). En resumen, la circulación anterior del encéfalo se distribuye así:

Arteria carótida interna

a. Segmentos:
- Cervical
- Intrapetroso
- Intracavernoso
- Supraclinoideo

b. Ramas
- Arteria oftálmica
- Arteria comunicante posterior (ACmP)
- Arteria coroidea anterior (ACoA)
- Arteria cerebral media (ACM)
- Arteria cerebral anterior (ACA)

Arteria cerebral anterior

a. Segmentos
- A1: de la ACI a la arteria comunicante anterior (ACmA)
- A2: de la ACmA a la rodilla del cuerpo calloso
- A3: porción que rodea la rodilla del cuerpo calloso

b. Ramas
- Arteria frontopolar
- Arteria pericallosa
- Arteria callosomarginal
- Arteria estriada medial (recurrente)
- Arteria comunicante anterior (ACmA)

Arteria cerebral media

a. Segmentos

- M1: desde la ACI hasta la trifurcación
- M2: segmentos superior, inferior y temporal anterior

Circulación posterior

La circulación posterior surge de las arterias vertebrales (derecha e izquierda), que provienen de las arterias subclavias. Como se mencionó antes, las arterias vertebrales ascienden hasta alcanzar el agujero transverso de la sexta vértebra cervical (figura 7.6), cursan a través de los agujeros transversos hasta alcanzar el atlas, perforan la duramadre y penetran por el agujero magno a la cavidad craneana. Las arterias vertebrales se unen para formar la arteria basilar, a nivel de la porción superior de la médula oblongada. El recorrido de las arterias vertebrales se divide en cuatro porciones: la primera (V1) va desde las arterias subclavias hasta la sexta vértebra cervical, la segunda (V2) corresponde al trayecto de la columna cervical, la tercera (V3) es la que rodea el atlas y se dirige hacia el agujero magno, y la cuarta (V4) es la porción intracraneana.

De la porción V4, cerca de la unión de las arterias vertebrales, nacen las ramas espinales anteriores y posteriores. Las ramas espinales anteriores se unen para formar la arteria espinal anterior (figura 7.6A) y las ramas espinales posteriores se dirigen hacia la cara posterior de la médula para formar, cada una, una arteria espinal posterior. Otras ramas mediales de las arterias vertebrales irrigan las pirámides y el lemnisco medial. De esta misma porción, se originan las arterias cerebelosas posteroinferiores (PICA, por su sigla en inglés), que suplen la mayor parte de la superficie inferior de los hemisferios cerebelosos. En su recorrido hacia el cerebelo, envían ramas que suplen el plexo coroideo del cuarto ventrículo y la cara lateral y estructuras profundas de la médula. La oclusión proximal de la arteria PICA genera una serie de síntomas que se conoce como síndrome de Wallenberg.

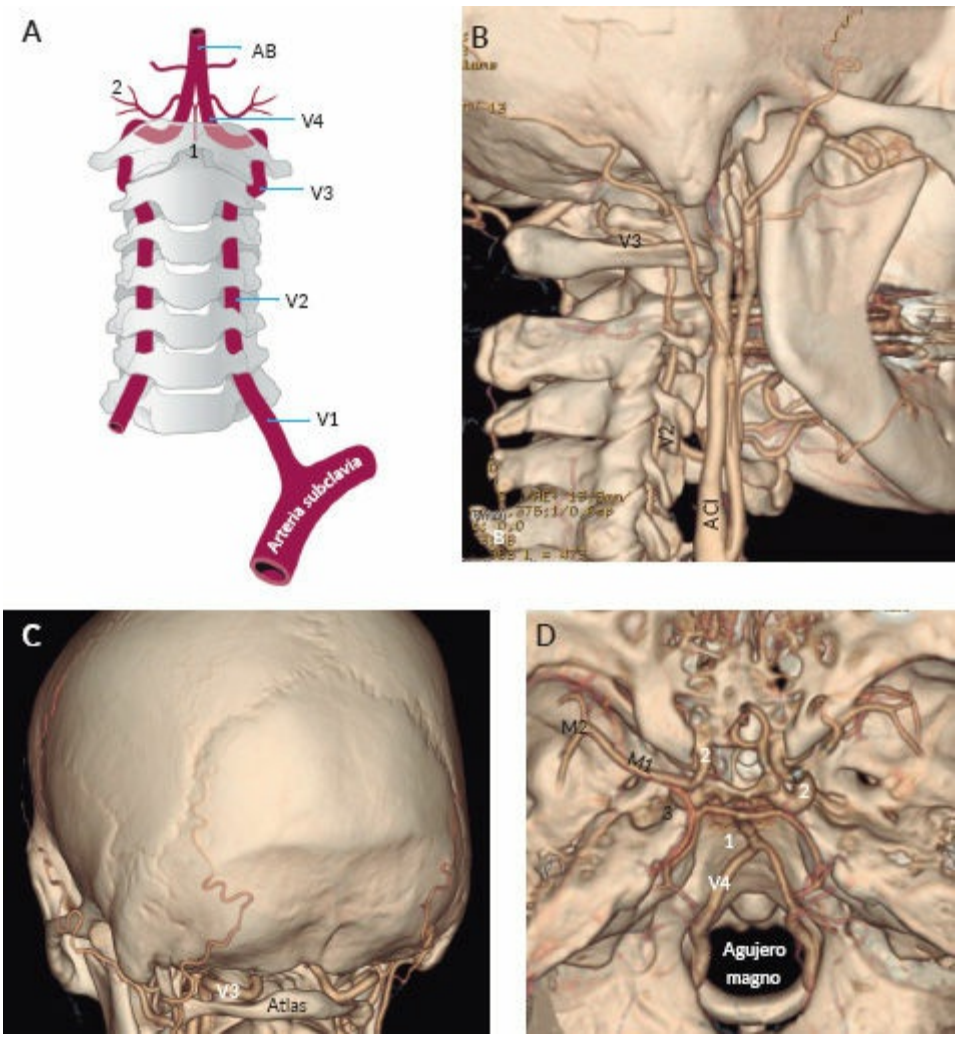


Figura 7.6A. Esquema de los segmentos de la arteria vertebral. AB: arteria basilar; 1: arteria espinal anterior; 2: arteria PICA. **Fuente:** adaptada de (1).

Figura 7.6B. Angio–TAC de la bifurcación de la arteria carótida común o primitiva. ACI: arteria carótida interna.

Figura 7.6C. Angio–TAC de la primera vértebra cervical (atlas) y el segmento V3.

Figura 7.6D. Angio–TAC de vista intracraneana. 1: arteria basilar; 2: arteria carótida interna; 3: arteria comunicante posterior.

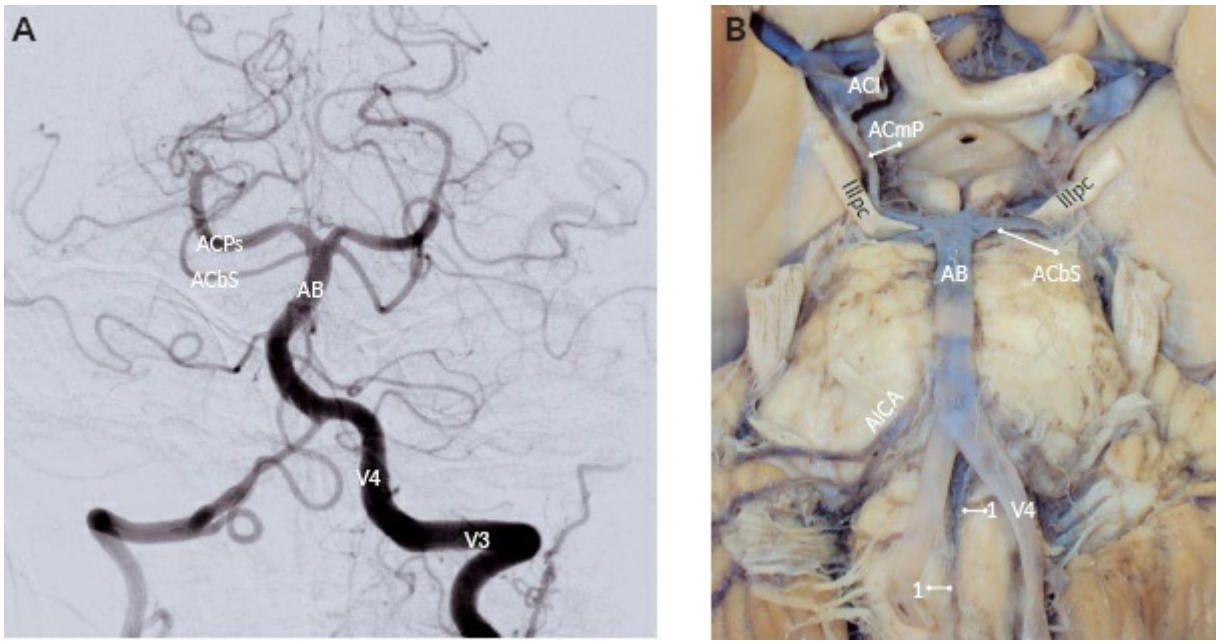


Figura 7.7A. Arteriografía de vista coronal que muestra la división del segmento V4 de las arterias vertebrales. AB: arteria basilar; ACbS: arteria cerebelosa superior; ACP: arteria cerebral posterior.

Figura 7.7B. Pieza anatómica que muestra las arterias señaladas en la figura anterior. ACbS: arteria cerebelosa superior; III pc: tercer par craneano; ACmP: arteria comunicante posterior; ACI: arteria carótida interna; AICA: arteria cerebelosa anteroinferior; 1: arteria espinal anterior.

La arteria basilar cursa a lo largo del surco basilar y da origen a las arterias cerebelosas anteroinferiores (AICA, por su sigla en inglés), que suplen la mayor parte de la porción anterior de la superficie inferior del cerebelo, es decir, los flóculos y parte del puente (figura 7.7A). Con frecuencia, la arteria laberíntica o auditiva interna se desprende de la arteria AICA y acompaña en su recorrido a los pares craneanos VII y VIII hasta alcanzar el oído interno. De la arteria basilar, se desprenden numerosas arterias perforantes que penetran al puente y al mesencéfalo; se denominan perforantes paramedianas, circunferenciales cortas y circunferenciales largas según su recorrido.

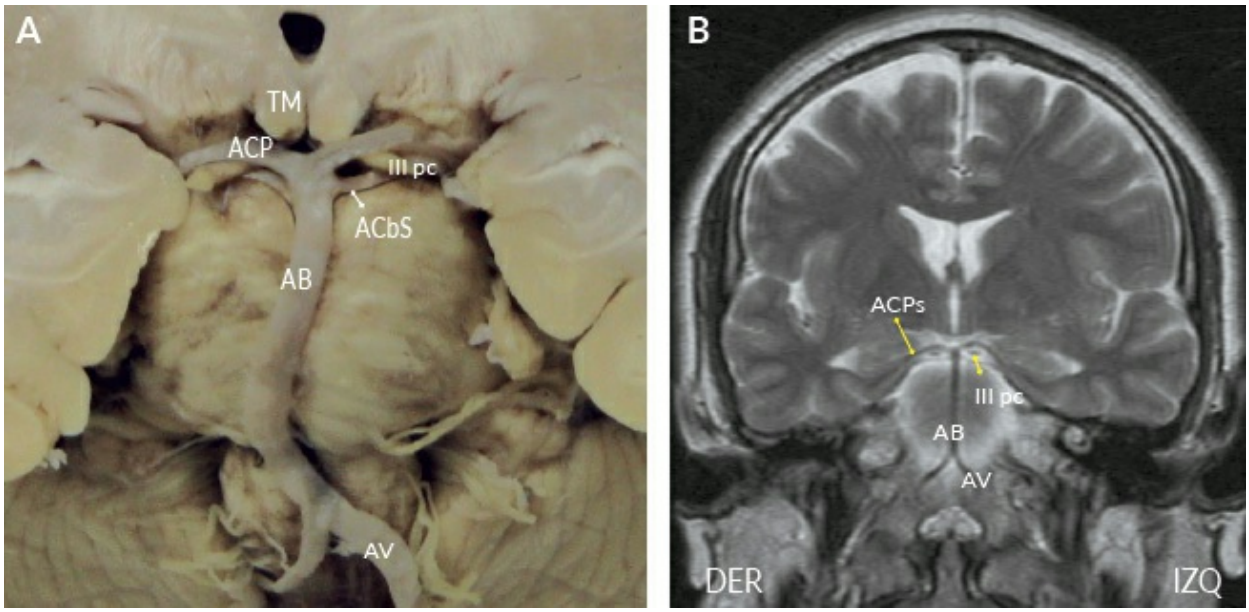


Figura 7.8A. Pieza anatómica de corte coronal hemisférico. TM: tubérculos mamilares; ACP: arteria cerebral posterior; III pc: tercer par craneano; ACbS: arteria cerebelosa superior; AB: arteria basilar; AV: arteria vertebral.

Figura 7.8B. IRM en T2 (T2–WI) que muestra los vasos sanguíneos señalados en la imagen anterior.

De la porción superior de la arteria basilar, se desprenden las arterias cerebelosas superiores (figuras 7.7 y 7.8). Estas derivan luego en ramas que perforan el puente y el mesencéfalo e irrigan la superficie superior del vermis, los hemisferios cerebelosos y los núcleos cerebelosos. Las arterias cerebrales posteriores (ACP) son las ramas terminales de la arteria basilar. Se dirigen hacia afuera rodeando el mesencéfalo, reciben las arterias comunicantes posteriores y transcurren a través de la cisterna superior o ambiens. En el recorrido de cada arteria cerebral posterior se identifican tres segmentos: el primero (P1) discurre entre el origen y la anastomosis con la arteria comunicante posterior, el segundo (P2) rodea el mesencéfalo y el tercero (P3) atraviesa la cisterna ambiens.

Del segmento P1, surgen ramas perforantes que irrigan el mesencéfalo y el tálamo. Del segmento P2, nacen las arterias coroideas posteriores que suplen los plexos coroideos del tercer ventrículo y del cuerpo del ventrículo lateral, la glándula pineal, la porción posterior del tálamo, el cuerpo geniculado medial y el esplenio del cuerpo calloso. La arteria coroidea posterior se anastomosa con la arteria coroidea anterior. Del segmento P3, se originan las ramas corticales que se distribuyen en la superficie inferior y medial del lóbulo temporal (ramas temporales anteriores y posteriores) y alrededor del surco calcarino. Estas ramas irrigan la cara medial e inferior del lóbulo occipital (lóbulo de la cuña y lingual) y la porción posterior del lóbulo parietal.

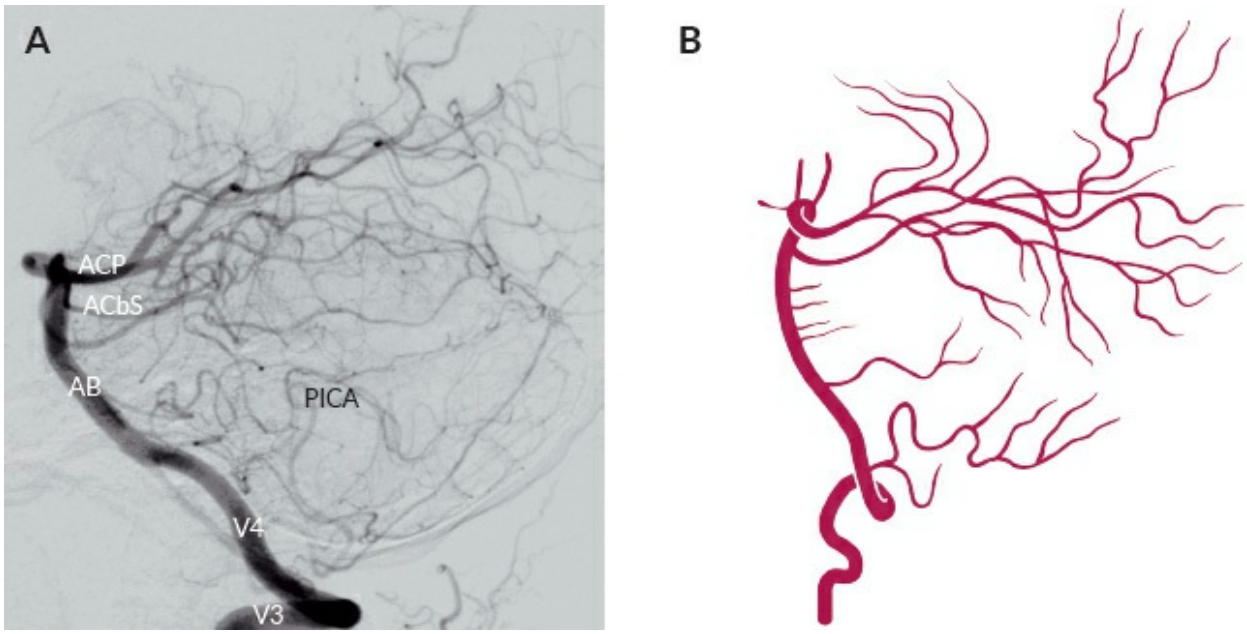


Figura 7.9A. Arteriografía de vista lateral de la circulación posterior. AB: arteria basilar; PICA: arteria cerebelosa posteroinferior; ACbS: arteria cerebelosa superior; ACP: arteria cerebral posterior. **Figura 7.9B.** Esquema de las arterias señaladas en la figura anterior. **Fuente:** adaptada de (1).

En síntesis, la circulación posterior del encéfalo se distribuye así:

Arteria vertebral
a. Segmentos: V1, V2, V3, V4
b. Ramas
- Arterias espinales anteriores
- Arterias espinales posteriores
- Arteria cerebelosa posteroinferior (PICA)
- Arteria meníngea posterior

Arteria basilar
a. Ramas
- Arteria cerebelosa anteroinferior (AICA)
- Arteria laberíntica
- Arterias pónticas: paramedianas y circunferenciales (cortas y largas)
- Arterias cerebelosas superiores
- Arterias cerebrales posteriores

Arteria cerebral posterior
a. Segmentos: P1, P2, P3
b. Ramas
- Ramas perforantes
- Arterias temporooccipitales posteriores y anteriores

- Arterias calcarinas y parietooccipital
- Arterias coroideas posteriores

Polígono cerebral o de Willis

Una de las principales características de la circulación cerebral es la abundancia de anastomosis entre grandes arterias. Algunos autores aseguran que el anatomista Gabriel Fallopius (1523–1562) fue el primero en mencionar la existencia de un círculo de arterias anastomóticas en la base del encéfalo. Sin embargo, la imagen que ilustra mejor este hallazgo anatómico y su posible función se le atribuye a Thomas Willis (1664), quien tuvo la ayuda de Christopher Wren, arquitecto de la catedral de Canterbury. La parte posterior del polígono está formada por la unión de las arterias carótidas internas con las arterias cerebrales posteriores a través de las arterias comunicantes posteriores y, la parte anterior, por la unión de las dos arterias cerebrales anteriores con la arteria comunicante anterior (figuras 7.10 y 7.11). Tras varios estudios de piezas anatómicas, se ha encontrado gran variabilidad en la disposición del polígono cerebral. De manera que algunos autores han señalado que la presencia de un polígono típico se encuentra en menos del 20 % de los especímenes estudiados.

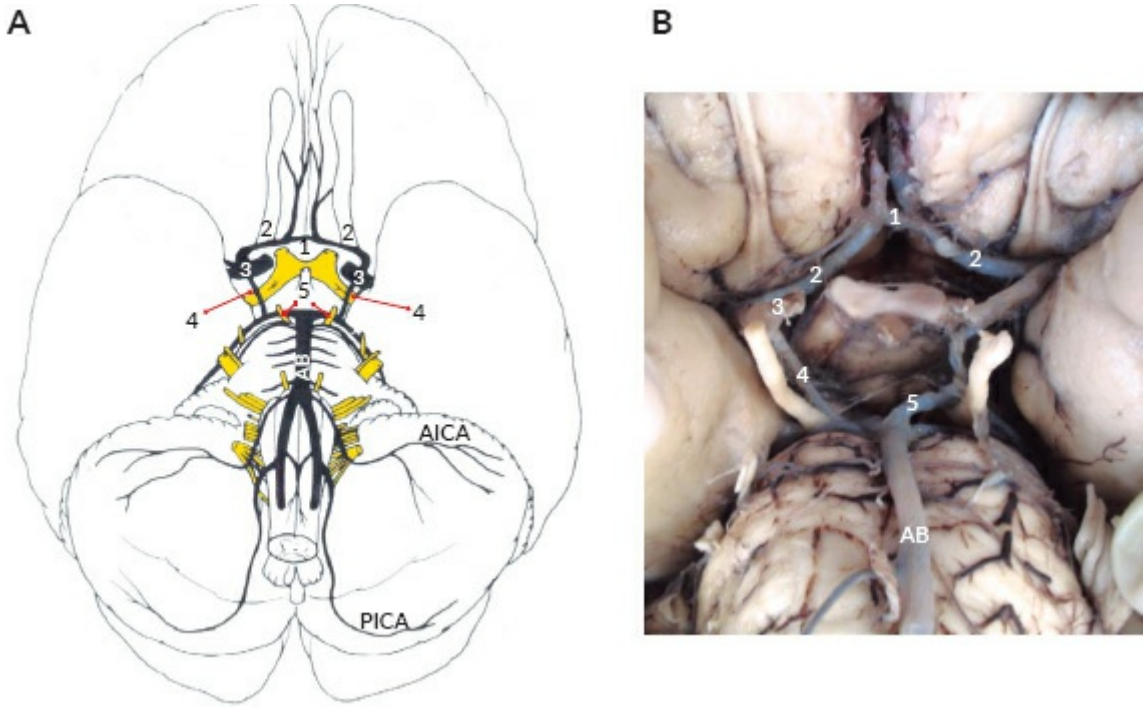


Figura 7.10A. Esquema de los componentes vasculares del polígono cerebral. 1: arteria comunicante anterior; 2: arterias cerebrales anteriores; 3: arterias carótidas internas; 4: arterias comunicantes posteriores; 5: arterias cerebrales posteriores. AB: arteria basilar; PICA: arteria cerebelosa posteroinferior; AICA: arteria cerebelosa anteroinferior.
Figura 7.10B. Pieza anatómica que muestra el polígono cerebral.

Los territorios vasculares de las arterias cerebrales anterior, media y posterior se resumen en la figura 7.12. La mayor parte de la cara lateral y de la región orbitofrontal está irrigada por ramas corticales de la arteria cerebral media. La mayor parte de la cara medial del cerebro hasta el surco parietooccipital (perpendicular), la región septal y el giro recto es suplida por ramas corticales de la arteria cerebral anterior. El lóbulo temporooccipital, el lobulillo de la cuña y el lobulillo lingual son irrigados por ramas de la arteria cerebral posterior. El hipocampo y el complejo amigdalino son alimentados por ramas de la arteria coroidea anterior. El hipocampo también recibe irrigación de la arteria cerebral posterior.

Sobre la superficie lateral de los hemisferios cerebrales, las ramas terminales de las arterias cerebrales se sobreponen y constituyen zonas limítrofes de irrigación en las áreas suplidas por estas arterias. Otras zonas limítrofes más pequeñas se encuentran entre los territorios de las arterias cerebral anterior y posterior, a nivel del surco parietooccipital, y entre los territorios de las arterias cerebelosas. El tejido cerebral localizado en estas zonas es particularmente susceptible a lesiones tisulares en presencia de hipotensión arterial sistémica.

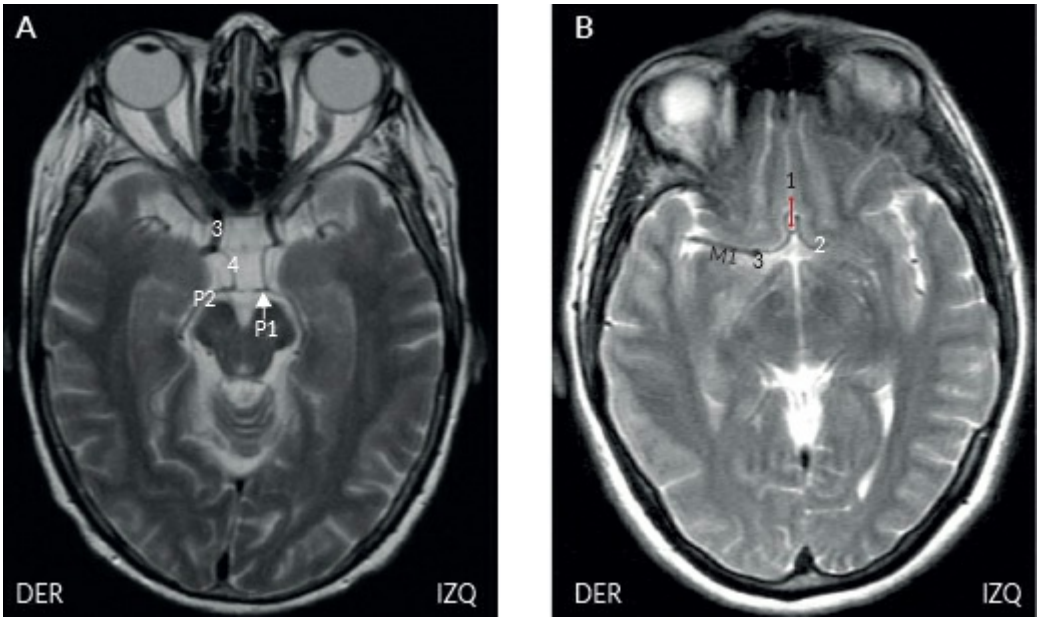


Figura 7.11A. IRM en T2 (T2–WI) de corte horizontal que muestra las arterias carótidas internas (3), las arterias comunicantes posteriores (4) y los segmentos P1 y P2.

Figura 7.11B. IRM en T2 (T2–WI) de corte horizontal que señala la arteria comunicante anterior (1), el segmento A1 de las arterias cerebrales anteriores (2), la arteria carótida interna (3) y la arteria cerebral media (M1).

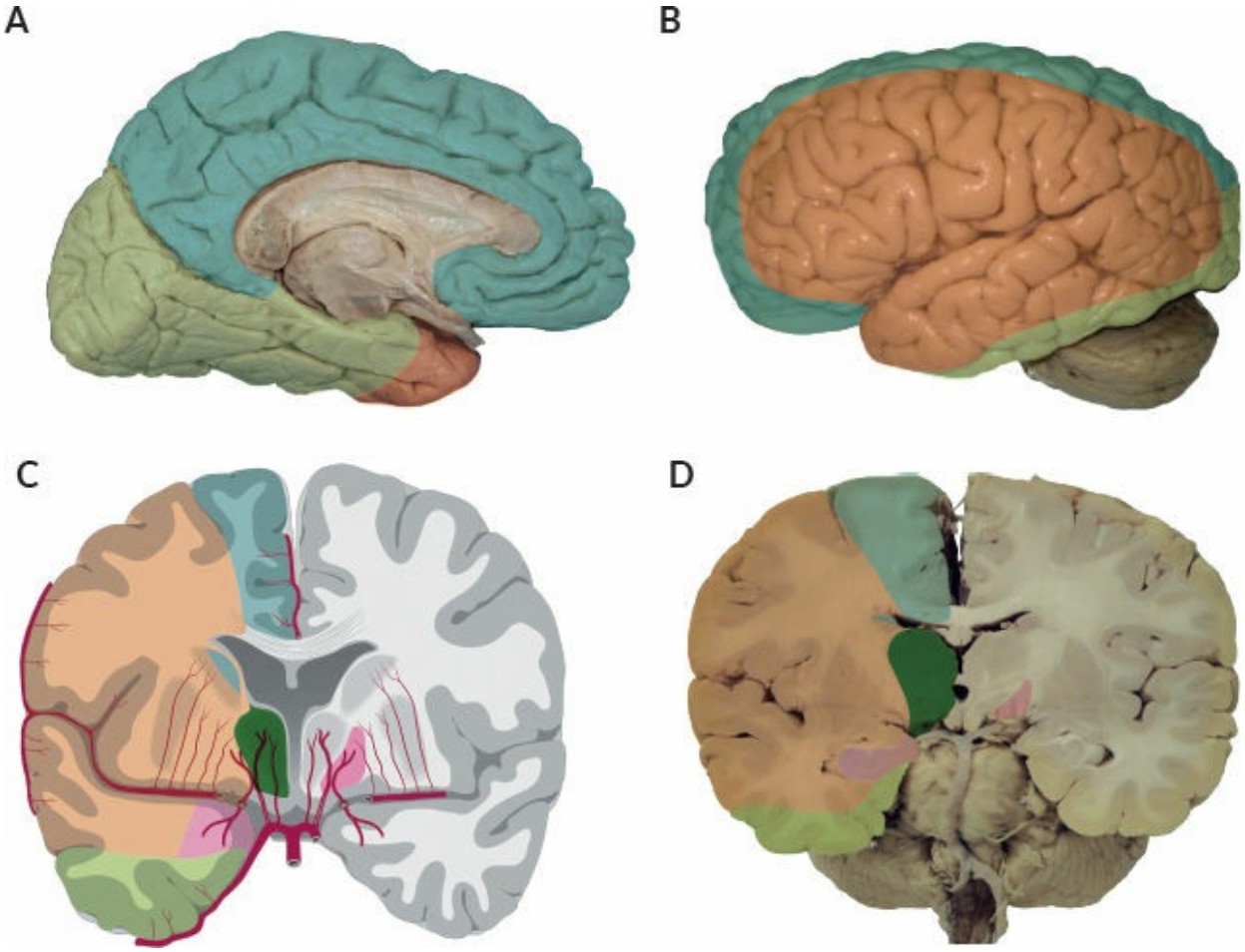
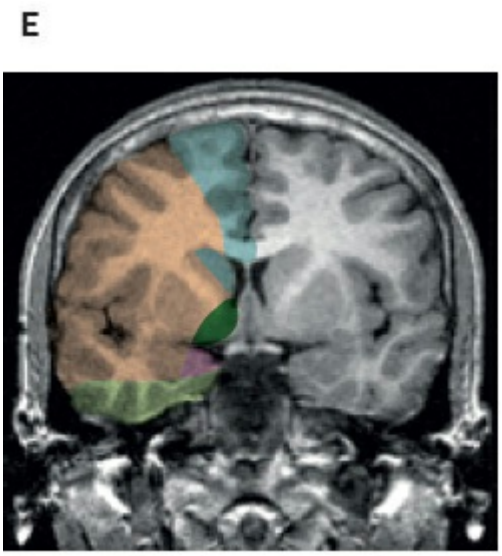


Figura 7.12A. Pieza anatómica de la cara medial y basal (inferior) de un hemisferio cerebral que muestra las áreas corticales irrigadas por la arteria cerebral anterior (azul), la arteria cerebral media (naranja) y la arteria cerebral posterior (verde).

Figura 7.12B. Pieza anatómica de la cara lateral de un hemisferio cerebral que muestra las áreas corticales irrigadas por la arteria cerebral anterior (azul), la arteria cerebral media (naranja) y la arteria cerebral posterior (verde).

Figura 7.12C. Esquema de corte coronal cerebral que muestra las áreas corticales y profundas irrigadas por la arteria cerebral anterior (azul), la arteria cerebral media (naranja), la arteria cerebral posterior (verde), la arteria coroidea anterior (rosa), y las arterias cerebral posterior, coroidea anterior y comunicante posterior (verde oscuro).

Figura 7.12D. Pieza anatómica de corte coronal cerebral que muestra las áreas corticales y profundas irrigadas de la figura anterior.



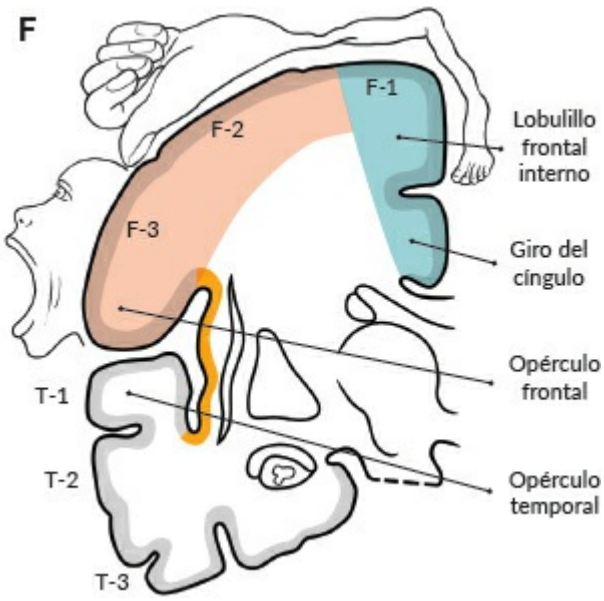
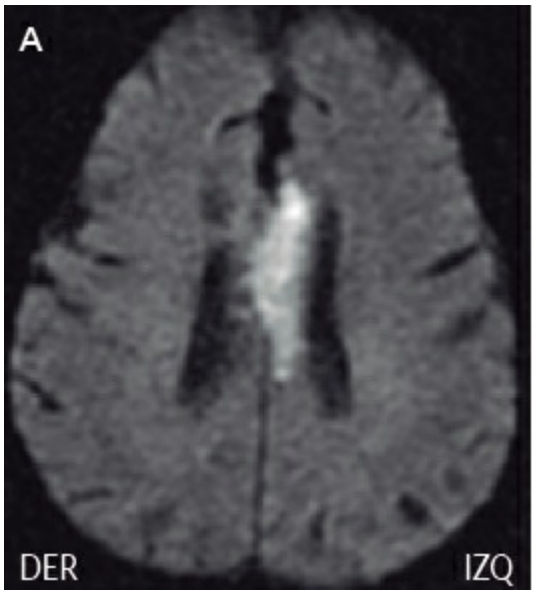


Figura 7.12E. IRM en T1 (T1–WI) de corte coronal cerebral que muestra las áreas corticales y profundas irrigadas de la figura C.
Figura 7.12F. Esquema de corte coronal de un hemisferio que señala el homúnculo y las arterias que lo irrigan: cerebral anterior (azul) y cerebral media (naranja).

Ejercicios clínicos

Caso 1

Un paciente de 68 años ingresa al servicio de urgencias por presentar tendencia al mutismo, dificultad para caminar por disminución en la fuerza de las extremidades inferiores (paraparesia) y retención urinaria. Se toman las irm cerebrales de la figura 7.13. ¿Cuál o cuáles lobulillos estarían comprometidos?, ¿la lesión corresponde a un infarto agudo de qué territorio arterial?, ¿estos hallazgos explican los síntomas del paciente?



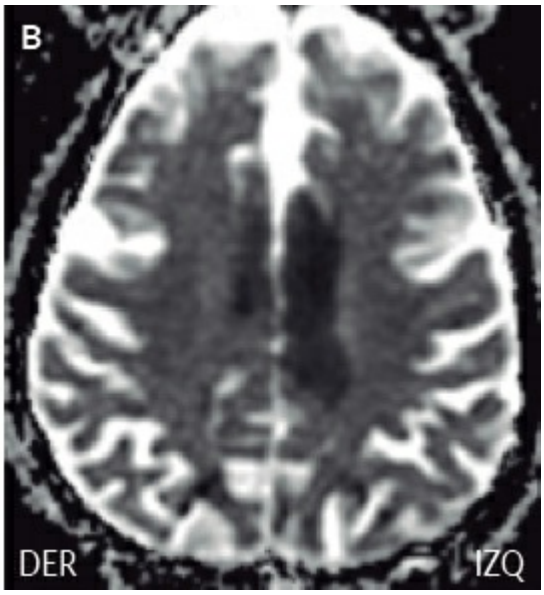


Figura 7.13A. IRM en difusión (DWI) que muestra lesión brillante en la región paracentral del hemisferio izquierdo y parte del hemisferio derecho.
Figura 7.13B. IRM en mapa ADC que muestra restricción en la porción paracentral del hemisferio izquierdo y, en menor volumen, en el hemisferio derecho.

Respuesta: las lesiones se presentan en el territorio de la arteria cerebral anterior y comprometerían el giro paracentral y el lobulillo frontal interno. En esta región se representa la extremidad inferior y la región del periné.

Caso 2

Una paciente de 56 años, con antecedentes de diabetes mellitus e hipertensión arterial, presenta dificultad para expresarse que sugiere afasia motora, pero que se resuelve espontáneamente al cabo de 15 minutos. Cuando la paciente llega al servicio de urgencias no se detecta anormalidad en el lenguaje, pero debido a sus antecedentes y al episodio claro de trastorno del lenguaje se realiza angio–tac cerebral (figura 7.14). ¿Cuál arteria presenta disminución en la luz (estenosis)?, ¿en qué segmento arterial?, ¿este hallazgo explica los síntomas de la paciente?

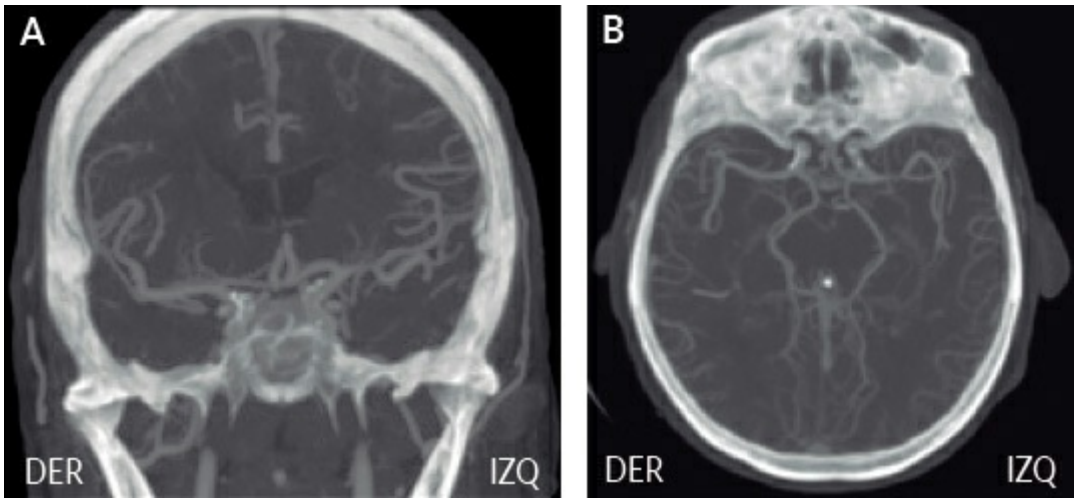


Figura 7.14A. Angio–TAC de vista coronal que muestra la arteria carótida interna con calcificaciones en la pared vascular. Además, se observa la división en T, que origina la arteria cerebral anterior y media.
Figura 7.14B. Angio–TAC de corte transversal que muestra las arterias carótidas internas con calcificaciones en la pared arterial y su relación con las apófisis clinoides anteriores. Además, se aprecia la arteria cerebral media, la arteria comunicante posterior y la arteria cerebral posterior con sus segmentos. Observe la diferencia de diámetro entre la arteria cerebral media izquierda y la derecha.

Respuesta: el segmento M1 de la arteria cerebral media izquierda presenta estenosis significativa, lo cual se relaciona con los síntomas de la paciente. El cuadro clínico corresponde a un episodio de isquemia cerebral transitoria.

Caso 3

Un paciente de 64 años ingresa al servicio de emergencias con déficit neurológico agudo. Se realiza irm (figura 7.15). ¿Qué hallazgos observa en la imagen?, ¿cuál territorio cerebral está afectado?, ¿qué síntomas presenta el paciente?

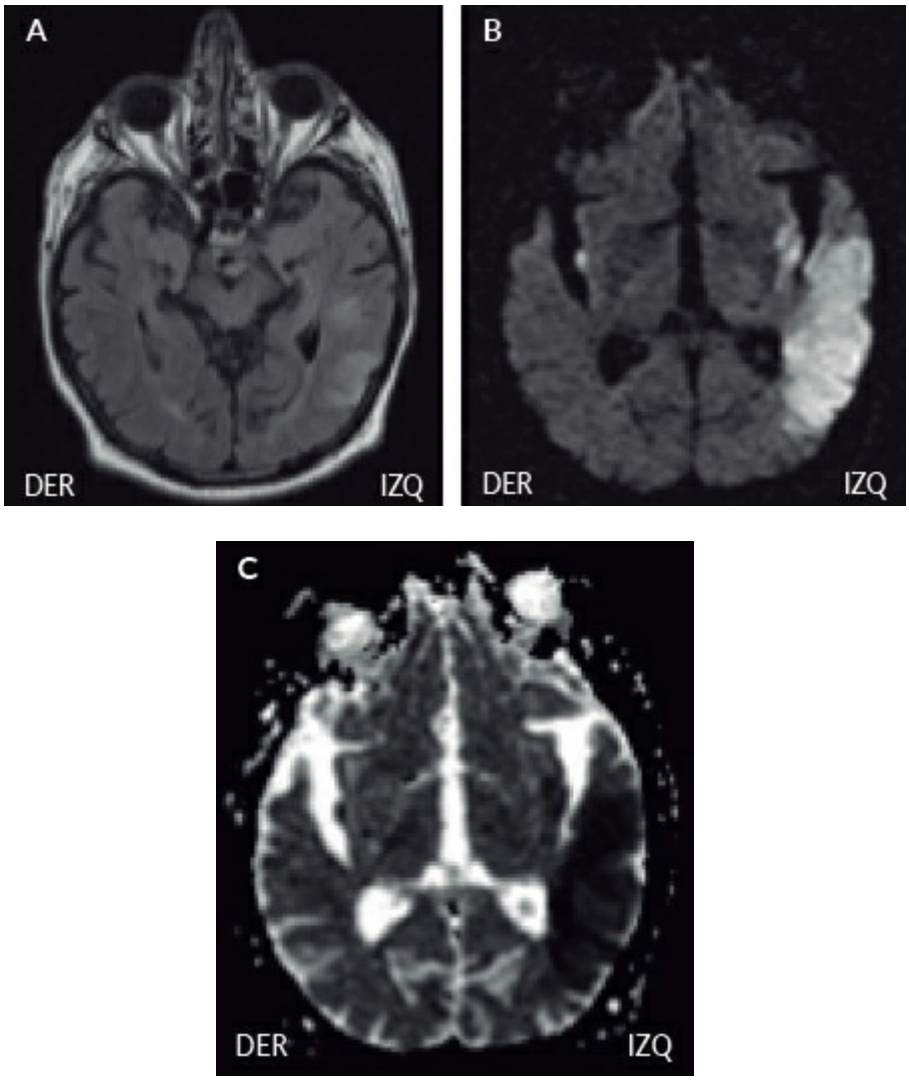


Figura 7.15A. IRM en T2 (FLAIR) de corte horizontal que muestra lesión en el lóbulo temporal izquierdo.
Figura 7.15B. IRM en difusión (DWI) que muestra hiperintensidad en el lóbulo temporal izquierdo.
Figura 7.15C. IRM en mapa ADC que confirma la presencia de infarto agudo en el lóbulo temporal izquierdo.

Respuesta: la lesión ocurre en el segmento M2 de la arteria cerebral media (ramas inferiores). El paciente presenta un trastorno del lenguaje conocido como afasia.

Caso 4

Una paciente de 53 años es encontrada a las cuatro de la madrugada en su lecho con imposibilidad para mover el hemicuerpo izquierdo. Se realiza irm

cerebral (figura 7.16). ¿Qué territorio vascular está comprometido?, ¿cuál segmento arterial?

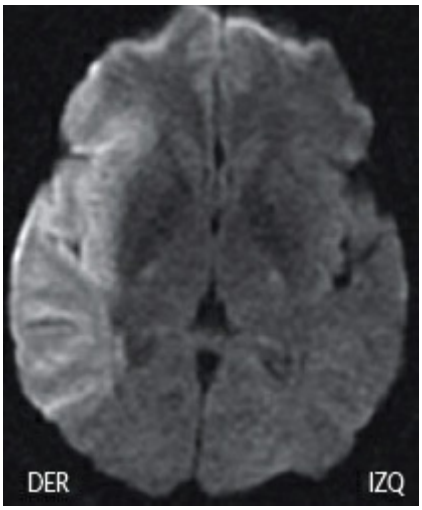


Figura 7.16. IRM en difusión (DWI) que detecta lesión hiperintensa en el territorio de la arteria cerebral media (M2) correspondiente a infarto cerebral derecho. Se observa que los núcleos basales no están comprometidos, lo que sugiere que el segmento M1 está permeable. Los hallazgos de la imagen se correlacionan con el déficit neurológico de la paciente.

Caso 5

Una paciente de 42 años que ha estado tomando medicamentos anticonceptivos, es hipertensa y muy ansiosa ingresa al servicio de emergencias porque presenta cuadro de ansiedad generalizada y hormigueo en todo el cuerpo. Además, se queja de que no siente bien el hemicuerpo y la hemicara derechos. Por sus antecedentes médicos y por ser el primer episodio de trastorno sensitivo, se toma irm (figura 7.17). ¿Qué aprecia?, ¿dónde ubica la lesión?, ¿esta lesión se correlaciona con la historia clínica de la paciente?, ¿qué territorio arterial está comprometido?

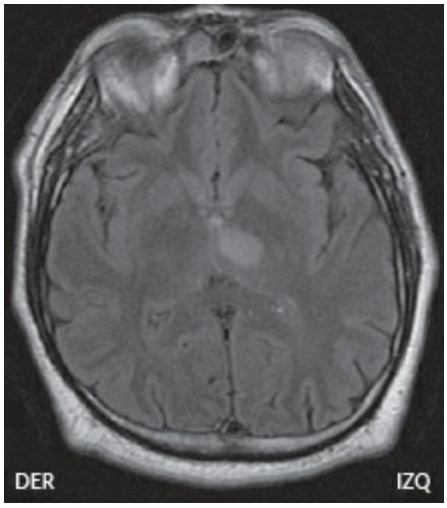


Figura 7.17. IRM en T2 (FLAIR) de corte transversal que muestra lesión en el tálamo izquierdo. Las lesiones en esta región ocasionan alteraciones sensitivas. El tálamo es irrigado por ramas de la

arteria cerebral posterior y, en su porción anterior, por ramas de la arteria coroidea anterior.

Caso 6

¿Qué hallazgos encuentra en las imágenes de la figura 7.18?, ¿cuál territorio vascular está afectado?, ¿qué síntomas puede presentar el paciente?

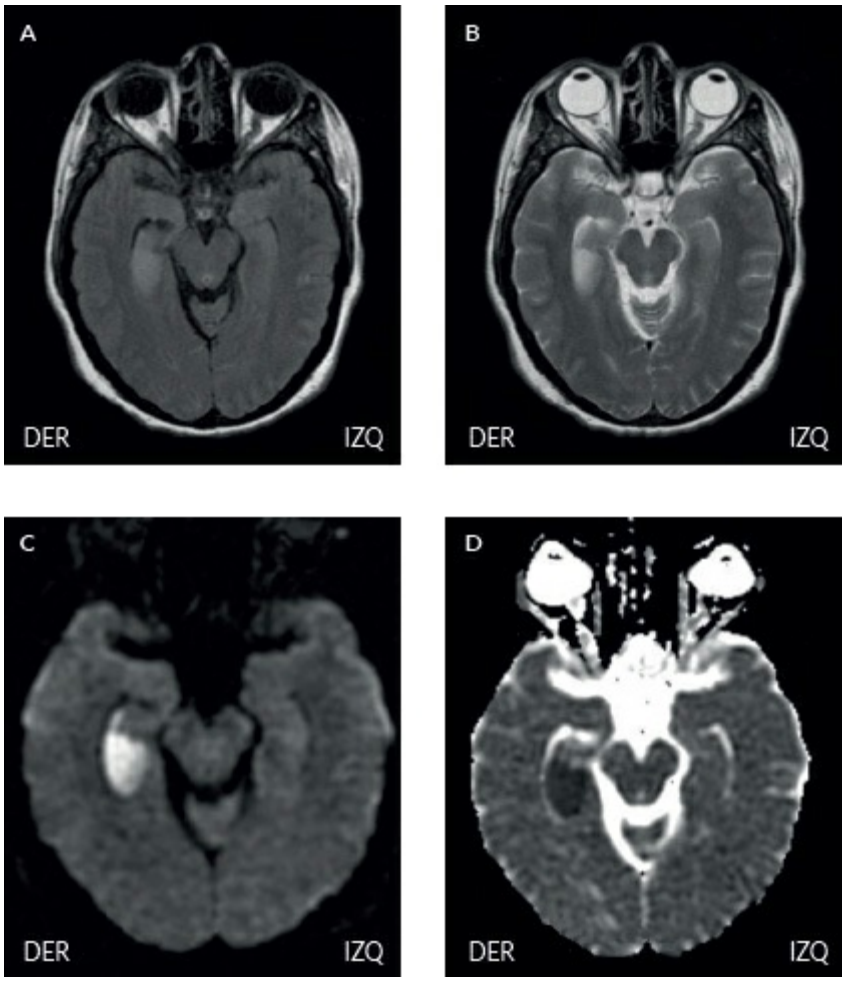


Figura 7.18A. IRM en T2 (FLAIR) que muestra lesión en el hipocampo derecho.
Figura 7.18B. IRM en T2 (T2–WI) que muestra lesión hiperintensa en el hipocampo derecho.
Figura 7.18C. IRM en difusión (DWI) que sugiere infarto agudo en el hipocampo derecho.
Figura 7.18D. IRM en mapa ADC que sugiere infarto agudo en el hipocampo derecho.

Respuesta: el paciente ingresó al servicio de emergencias por pérdida súbita de la memoria. El territorio arterial comprometido es el de la arteria coroidea anterior derecha.

Caso 7

Un paciente de 48 años se encontraba nadando y súbitamente presentó sensación de mareo que lo obligó a abandonar la piscina. El paciente no se puede sostener en pie (ataxia) y requiere ayuda de sus familiares. Se

realiza irm (figura 7.19). ¿Qué hallazgos observa?, ¿qué territorio vascular está comprometido?

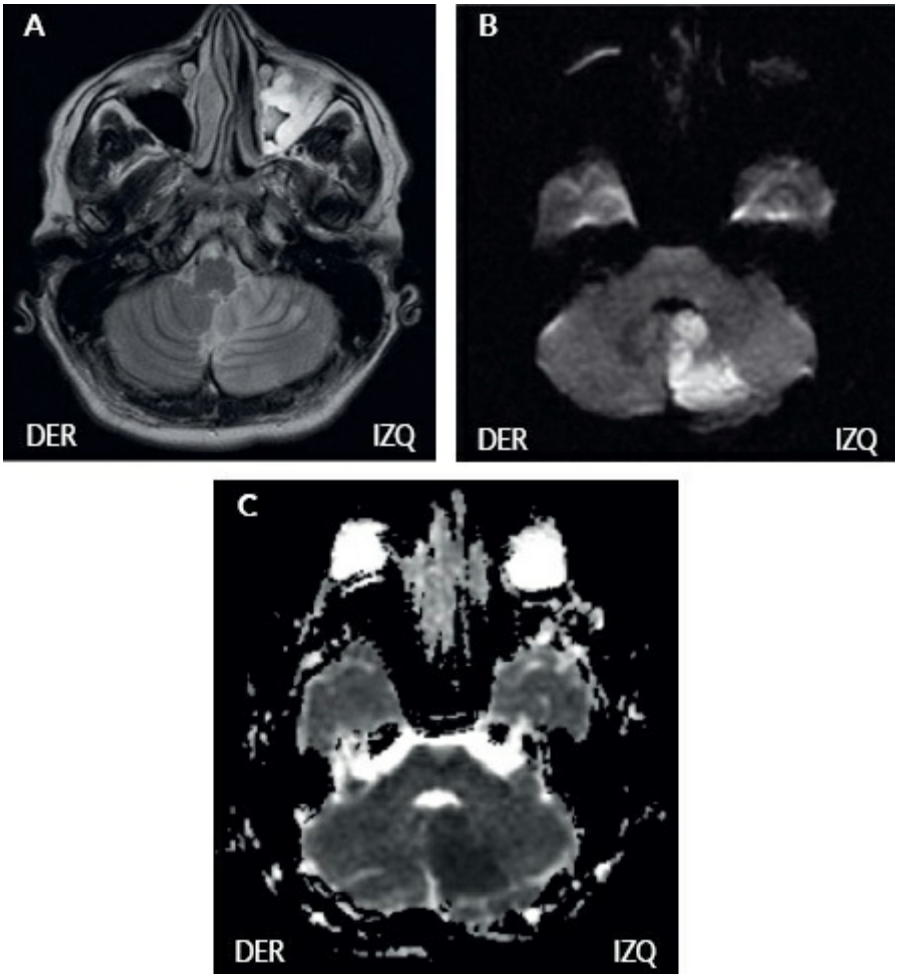


Figura 7.19A. IRM en T2 (T2–WI) de vista transversal que muestra lesión hiperintensa en la cara inferior del hemisferio cerebeloso izquierdo y el vermis.
Figura 7.19B. IRM en difusión (DWI) de vista transversal que muestra lesión brillante en la porción medial del hemisferio cerebeloso izquierdo y el vermis.
Figura 7.19C. IRM en mapa ADC de vista transversal que muestra lesión hipointensa en la porción medial del hemisferio cerebeloso izquierdo y el vermis. Esto sugiere infarto agudo de los territorios señalados.

Respuesta: los hallazgos corresponden a una lesión isquémica del territorio de la arteria PICA.

CIRCULACIÓN ARTERIAL DEL CORDÓN ESPINAL

El cordón espinal está irrigado por ramas derivadas de las arterias vertebrales y por múltiples ramas radiculares que provienen de vasos segmentarios (arterias cervicales ascendentes, cervicales profundas, intercostales, lumbares

y sacras). Las ramas de las arterias vertebrales suplen la mayor parte de la porción cervical del cordón espinal. De las arterias vertebrales, se desprenden las arterias espinales anteriores —que convergen para formar la arteria espinal anterior— y las arterias espinales posteriores.

Arterias radiculares

Las arterias radiculares atraviesan el agujero intervertebral y se dividen en anterior y posterior (figura 7.20A). Constituyen el principal flujo arterial de los segmentos torácico, lumbar, sacro y coccígeo del cordón espinal.

Arterias radiculares anteriores: contribuyen a formar la arteria espinal anterior. Se localizan principalmente en el lado izquierdo de las regiones torácica y lumbar del cordón espinal y en ambos lados de la región cervical (figura 7.20B). Acompañan en su recorrido a la raíz anterior del nervio espinal. Aunque el número de arterias radiculares es variable, en general se encuentran de dos a cinco cervicales (pares), de dos a cuatro torácicas (impares) y de una a tres lumbares. Entre estas últimas, se incluye la arteria radicular anterior magna (Adamkiewicz) o arteria del engrosamiento lumbar, que puede suplir toda la región sacrolumbar del cordón espinal, es decir, cerca del 25 % de este.

Arterias radiculares posteriores: contribuyen a formar las arterias espinales posteriores. Pueden ser de 15 a 22. A pesar de ser más numerosas, suelen ser más delgadas.

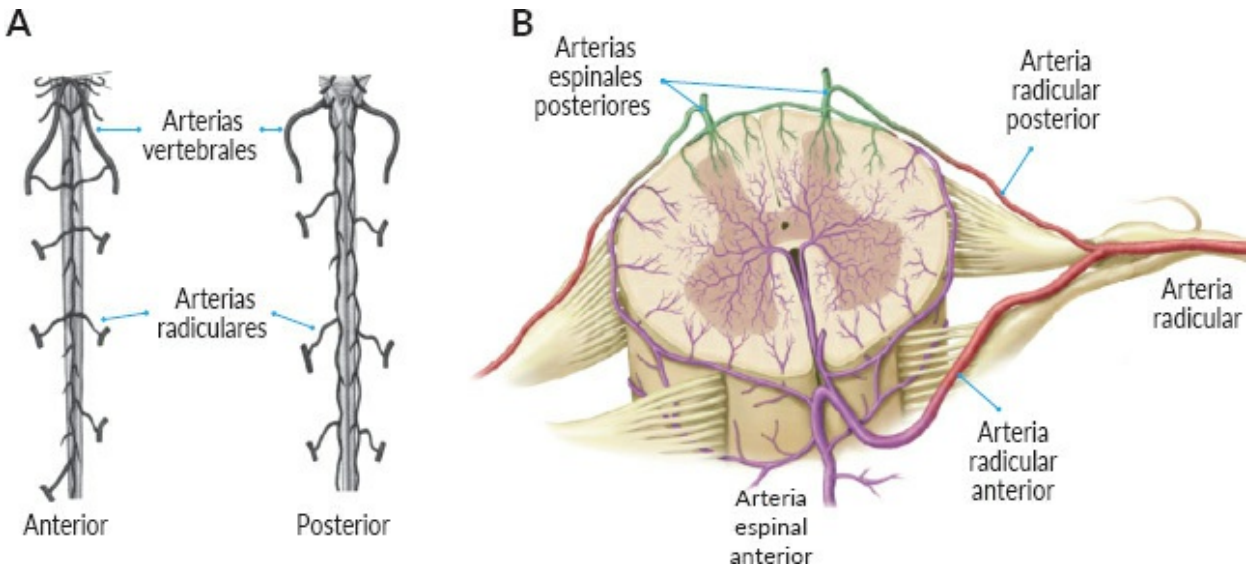


Figura 7.20A. Esquema con vistas anterior (ventral) y posterior (dorsal) de la irrigación del cordón espinal. **Fuente:** adaptada de (2).

Figura 7.20B. Esquema de un corte transversal del cordón espinal que muestra la distribución de las arterias espinales posteriores y la arteria espinal anterior. **Fuente:** adaptada de (3).

Arterias espinales posteriores

Las arterias espinales posteriores descienden sobre la superficie posterior del cordón espinal, mediales a las raicillas posteriores (figura 7.20B). En su trayecto por el cordón, reciben ramas de las arterias vertebrales (porción cervical) y de las arterias radiculares posteriores. En algunos segmentos del cordón, las arterias espinales posteriores se adelgazan tanto que parecen discontinuas. Estas arterias irrigan el tercio posterior del cordón espinal, es decir, las astas posteriores y los cordones posteriores, incluyendo los fascículos grácil y cuneatus de la porción cervical.

Arteria espinal anterior

La arteria espinal anterior desciende a lo largo del surco espinal anterior. La continuidad de esta arteria depende de las ramas anastomóticas que recibe de las arterias vertebrales (porción cervical) y de ramas radiculares anteriores. Esta arteria se estrecha en la región torácica, por lo cual esta región del cordón tiene riesgo de lesión vascular. La arteria espinal anterior da origen a cientos de ramas centrales y circunferenciales, e irriga los dos tercios anteriores del cordón espinal, es decir, las astas anteriores, las astas laterales, la porción anterior de los cordones posteriores y los cordones anteriores y laterales. De estas arterias, se originan ramas horizontales que se anastomosan para formar un círculo arterial periespinal (vasocorona) en torno a cada segmento espinal. De estas arterias vasocoronas, nacen ramas que penetran en los cordones laterales.

Ejercicio clínico

Un paciente súbitamente presenta cuadriparesia (disminución de la fuerza en las cuatro extremidades) e hipoestesia (disminución de la sensibilidad para el dolor) desde el segmento C6 hacia abajo, sin compromiso del estado de consciencia ni de pares craneanos. Se toma irm del cordón espinal cervical (figura 7.21).

Figura 7.21. IRM en T2 (T2–WI) que muestra área hiperintensa en la porción anterior del cordón espinal, a nivel de los segmentos C5–C6, compatible con lesión vascular del territorio de la arteria espinal anterior.

CIRCULACIÓN VENOSA DEL ENCÉFALO

El sistema venoso del encéfalo está constituido por los senos venosos durales y las venas superficiales y profundas. Los senos venosos durales son vasos trabeculados con una capa endotelial, cuyas paredes están formadas por las capas interna y externa de la duramadre. Los senos venosos se forman en los sitios donde se producen las prolongaciones de la duramadre, como la hoz del cerebro, la hoz del cerebelo, el tentorio del cerebelo y el tentorio de la silla turca. Los vasos venosos drenan en los senos venosos, que a su vez drenan en las venas del cuello y en la vena cava superior.

Senos venosos

El seno sagital —o longitudinal— superior (sss) se localiza en el borde superior o fijo de la hoz del cerebro, y va desde la apófisis crista galli hasta la protuberancia occipital interna, donde drena en la confluencia de los senos, también llamada torcular Herophili o tórcula. La porción posterior es más voluminosa que la anterior. El sss drena la mayor parte de la sangre venosa de los hemisferios cerebrales a través de las venas corticales y recibe vasos venosos del cuero cabelludo a través de las venas emisarias. Las granulaciones aracnoideas que drenan líquido cefalorraquídeo penetran en el sss. El seno sagital —o longitudinal— inferior (ssi) es más pequeño que el superior y se localiza en el borde libre de la hoz del cerebro. Su porción

posterior se une a la gran vena cerebral o vena de Galeno.

El seno recto es la continuación del seno longitudinal inferior y se localiza en la unión de la hoz del cerebro con el tentorio del cerebelo. Al seno recto drena la gran vena cerebral o de Galeno. Este seno termina en la confluencia de los senos, usualmente en el seno transverso izquierdo. Los senos transversos derecho e izquierdo se originan a nivel de la tórcula y cursan en dirección lateral a lo largo del borde fijo del tentorio del cerebelo. A nivel de la porción petrosa, los senos transversos se continúan con los senos sigmoides, que cursan en dirección inferior hasta alcanzar el agujero yugular, donde se continúan con las venas yugulares internas. Con frecuencia, el seno transverso izquierdo es hipoplásico (poco desarrollado).

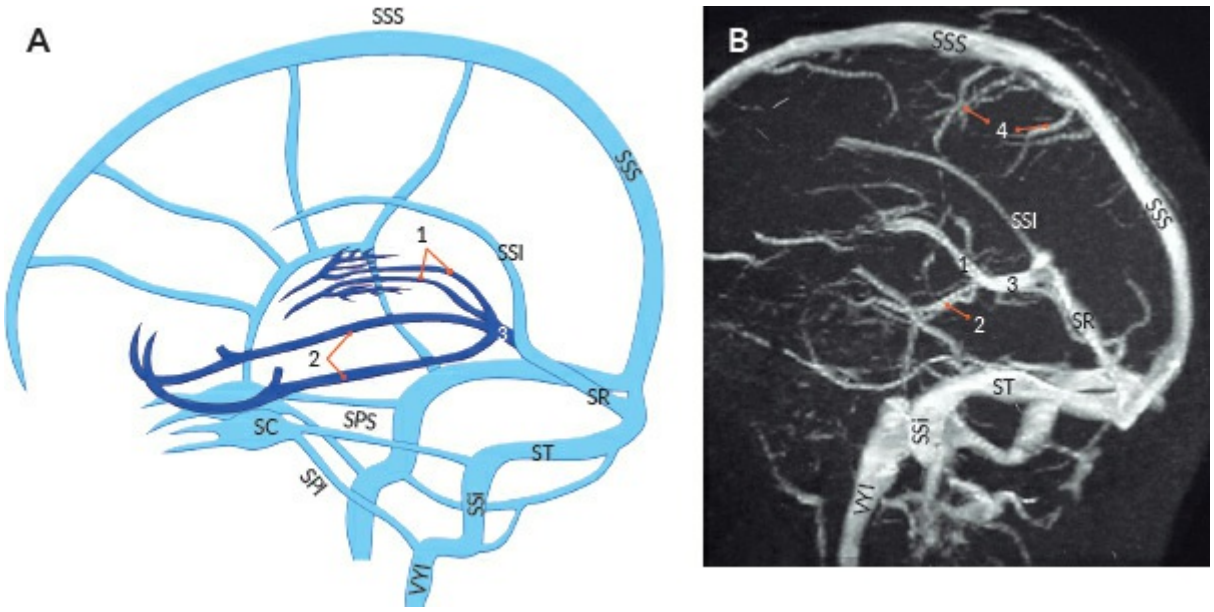


Figura 7.22A. Esquema del sistema venoso del encéfalo. Azul claro: senos durales y venas superficiales; azul oscuro: venas profundas; SSS: seno sagital superior; SSI: seno sagital inferior; SR: seno recto; ST: seno transverso; SSi: seno sigmoide; VYI: vena yugular interna; SC: seno cavernoso; SPS: seno petroso superior; SPI: seno petroso inferior; 1: venas cerebrales internas; 2: venas basales (Rosenthal); 3: gran vena cerebral o vena de Galeno.

Figura 7.22B. IRM de venografía con contraste en la que se aprecian los senos venosos, las venas superficiales (4) y las venas profundas.

Los dos senos cavernosos forman la pared lateral de la silla turca y están comunicados mediante los senos intercavernosos anterior y posterior. Las venas oftálmica y facial drenan en el seno cavernoso ipsolateral. Las arterias carótidas internas se localizan dentro de los senos cavernosos al igual que los pares craneanos iii, iv, vi y las ramas V1 y V2. Los senos petrosos superior e inferior se originan de los senos cavernosos y drenan en los senos sigmoides y la vena yugular interna. El seno occipital se localiza en el borde fijo de la hoz del cerebelo, a nivel de la protuberancia occipital interna, y drena en la confluencia de los senos (figura 8.6A).

En resumen, los senos venosos durales se distribuyen así:

Mediales

a. Seno sagital (longitudinal) superior
b. Seno sagital (longitudinal) inferior
c. Seno recto
d. Confluencia de los senos (tórcula)
e. Senos cavernosos (reciben la vena oftálmica y el seno esfenoparietal)
f. Plexo (seno) venoso basilar
g. Seno occipital

Laterales

a. Seno lateral: seno transverso (horizontal) y seno sigmoide (vertical)
b. Seno petroso superior
c. Seno petroso inferior

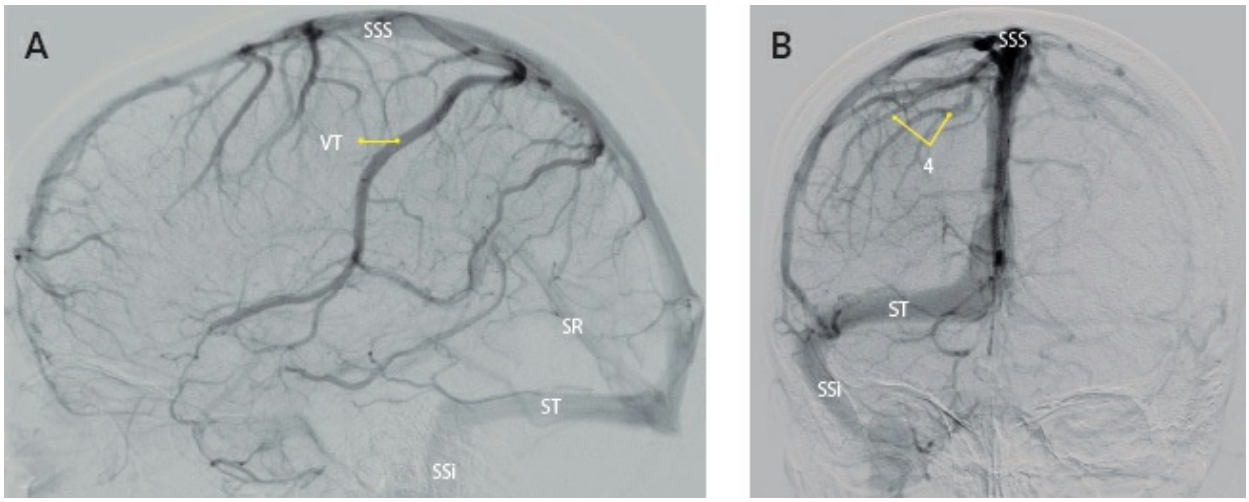


Figura 7.23A. Angiografía cerebral en fase venosa con vista lateral. SSS: seno sagital superior; SR: seno recto; ST: seno transverso; SSi: seno sigmoide; VT: vena de Trolard.
Figura 7.23B. Angiografía en fase venosa con vista coronal. 4: venas corticales.

Venas cerebrales

Las venas del encéfalo surgen de una anastomosis de vasos superficiales donde drenan los capilares. Por lo general, transcurren lejos de las arterias. Estas venas superficiales drenan en los senos venosos y sus paredes forman un receso entre el endotelio, que tapiza las venas y la duramadre. El drenaje venoso está constituido por dos grupos de venas. El primero está formado por las venas superficiales que drenan la corteza cerebral y la sustancia blanca subcortical en los senos venosos. El segundo está formado por las venas cerebrales internas o profundas que drenan el tálamo, los núcleos basales, los plexos coroideos y el septum en la gran vena cerebral o de Galeno, que a su vez drena en el seno recto.

La configuración de las venas en la superficie del cerebro presenta una variabilidad considerable. En general, se describen de 6 a 15 venas cerebrales

superiores que drenan la cara medial y la porción superior de la cara lateral del hemisferio cerebral y terminan en el seno sagital superior. Las venas cerebrales inferiores drenan las porciones lateral y basal del hemisferio en la vena cerebral media. Esta transcurre por el surco lateral hasta alcanzar el seno cavernoso o el seno esfenoparietal. La vena de Trolard comunica las venas cerebrales superiores e inferiores estableciendo un canal anastomótico entre el seno sagital superior, la vena cerebral media y el seno cavernoso. La vena de Labbé es otro canal anastomótico que comunica la vena cerebral media con el seno transverso.

Las venas cerebrales internas nacen detrás del agujero de Monro, se dirigen hacia atrás una al lado de la otra, cerca de las habénulas, y terminan en la gran vena cerebral o vena de Galeno. A las venas cerebrales internas drenan las venas talamicoestriadas —que cursan entre el núcleo caudado y el tálamo, a nivel del piso del cuerpo del ventrículo lateral— y las venas septales, denominadas así porque cursan por la parte posterior del septum lúcido. La vena de Galeno recibe las dos venas cerebrales internas (derecha e izquierda), las venas basales (Rosenthal), que drenan áreas corticales extensas como la de la ínsula, y las venas callosas posteriores, que drenan porciones mediales de la corteza.

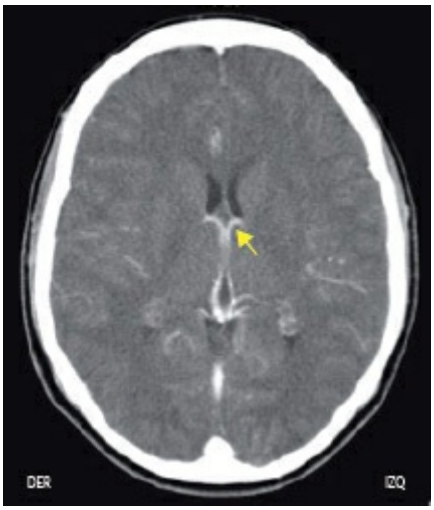


Figura 7.24. TAC cerebral con medio de contraste que muestra las venas cerebrales internas (▶) a nivel del agujero interventricular, que se dirigen hacia atrás y confluyen en la gran vena cerebral.

Venas del tronco cerebral y del cerebelo

Las venas que drenan el tronco cerebral y el cerebelo se dividen en tres grupos: el grupo superior drena la cara superior del cerebelo y la porción rostral del tronco cerebral en la vena de Galeno en las venas basales o en los senos petrosos; el grupo petroso drena la cara anterior del tronco cerebral y la cara superior e inferior del cerebelo en los senos petrosos; el grupo tentorial drena la porción posterior e inferior del vermis en el seno recto o en

los senos laterales.

En síntesis, las venas cerebrales se distribuyen así:

Superficiales: drenan la corteza y la sustancia blanca subyacente. Desembocan en los senos sagitales, cavernosos, laterales y petrosos.

a. Venas cerebrales superiores.

b. Venas cerebrales inferiores.

c. Vena cerebral media, que recibe las venas anastomóticas superior (Trolard) e inferior (Labbé).

Profundas: drenan la sustancia blanca, los núcleos grises y las formaciones coroideas. Desembocan principalmente en el seno recto.

a. Venas cerebrales internas.

b. Venas cerebrales basales.

c. Vena cerebral magna (Galeno), que recibe las venas cerebrales internas, las basales, las occipitales y las callosas posteriores. Desemboca en el seno recto, unida al seno sagital inferior.

Las venas cerebelosas se dividen en:

Superiores e inferiores mediales: drenan en la vena magna.

Superiores e inferiores laterales: drenan en los senos petrosos.

Y las venas del tronco cerebral se anastomosan entre sí y desembocan en las venas espinales, venas cerebrales basales, plexo venoso basilar, senos petrosos y seno sigmoideo.

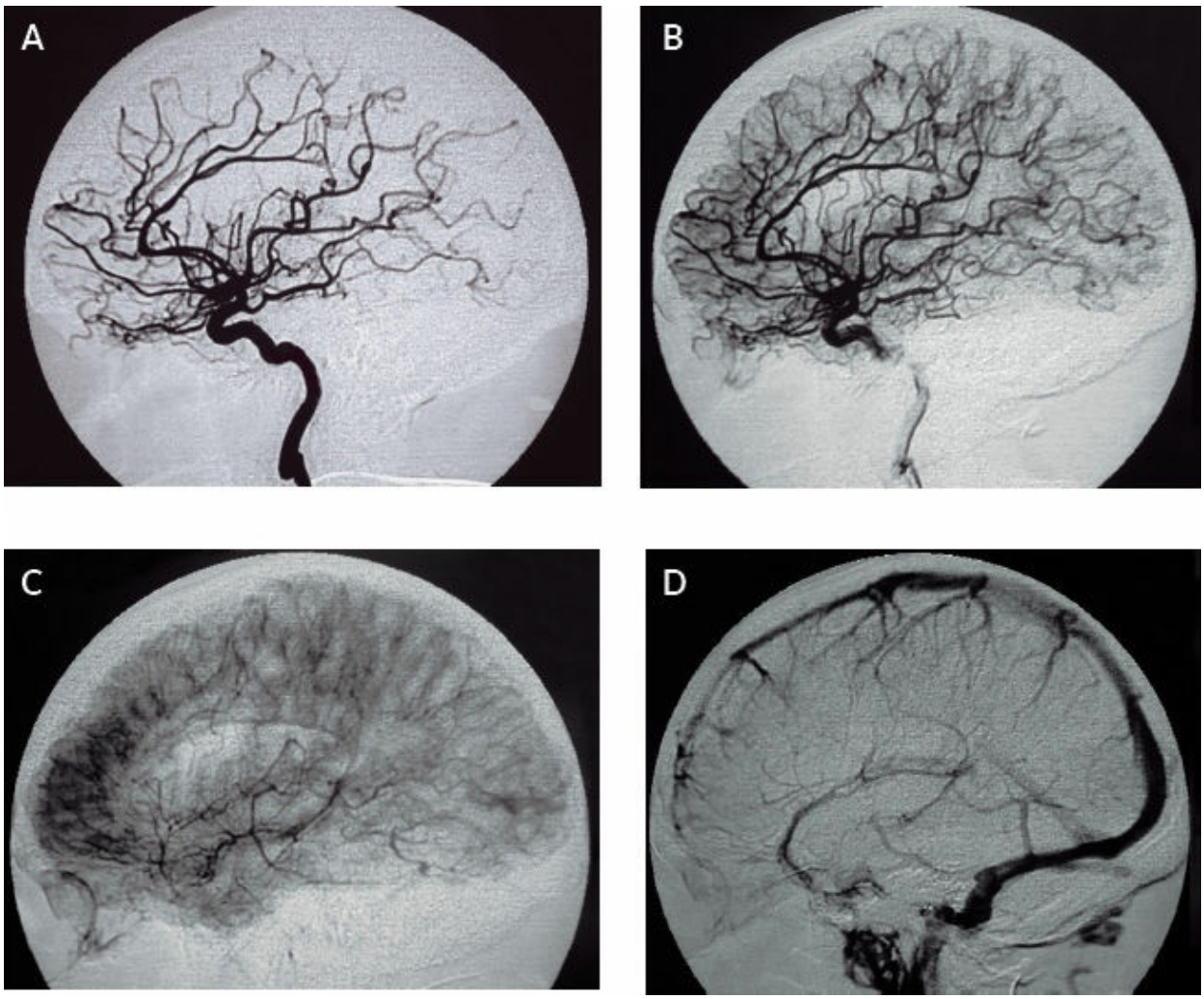


Figura 7.25. Angiografía cerebral con secuencia del flujo cerebral que muestra la fase arterial (A), la fase arterial y capilar (B), la fase capilar (C), y la fase venosa (D).

CIRCULACIÓN VENOSA DEL CORDÓN ESPINAL

En el cordón espinal hay vénulas y venas intraespinales, venas espinales y venas radiculares. Estas desembocan en los plexos venosos intrarraquídeos (epidulares), que se anastomosan con los plexos venosos extrarraquídeos y con venas de las cavidades del tronco, a nivel de los agujeros intervertebrales. En la región cervical, los plexos venosos intrarraquídeos se anastomosan con los plexos venosos occipital y basilar.

Ejercicio clínico

Una paciente de 42 años asiste al servicio de urgencias por presentar cefalea intensa progresiva de cuatro días de evolución, acompañada de náuseas y vómito en las últimas 24 horas. En el examen físico no se encuentra déficit

neurológico evidente. Se realiza irm cerebral y angiorresonancia (figura 7.26). ¿Qué hallazgos observa?

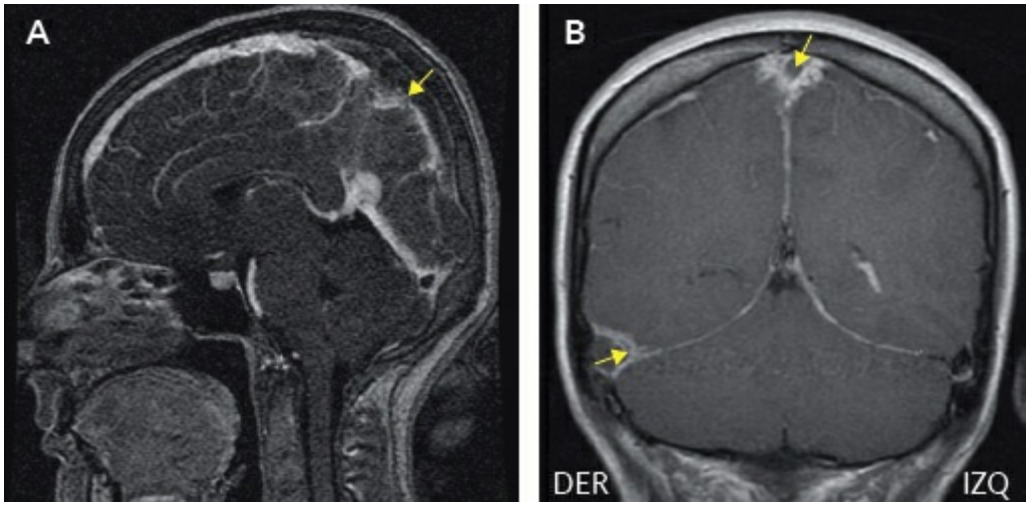


Figura 7.26A. Angiorresonancia de corte sagital en la que se observa trombosis en la mitad posterior del seno sagital superior (▶) y del seno transverso.
Figura 7.26B. IRM de corte coronal con medio de contraste en la que se aprecia trombosis del seno sagital superior y del seno transverso derecho (▶). Compare el seno transverso derecho con el izquierdo.

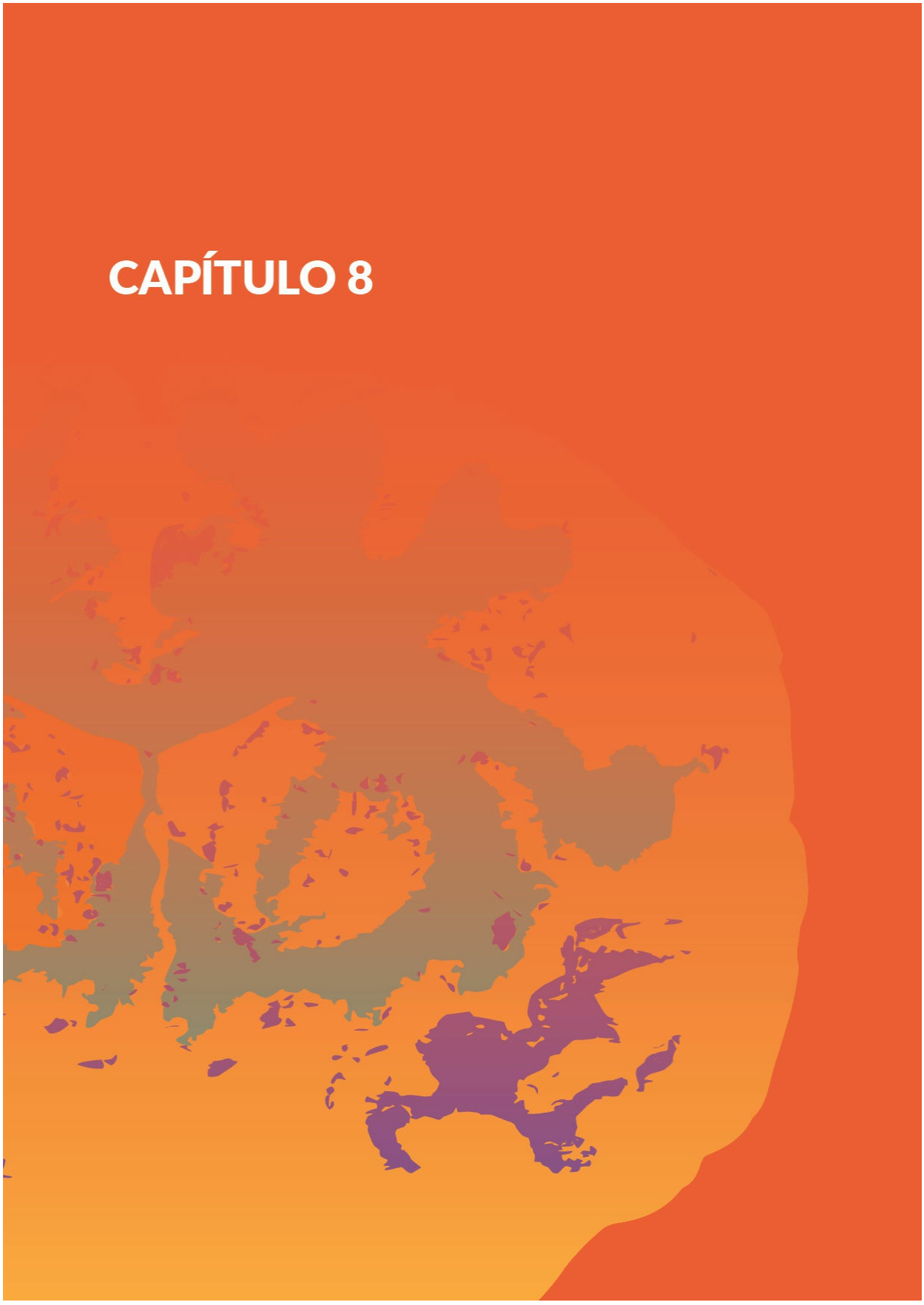
REFERENCIAS

1. Caplan L. Caplan's stroke: a clinical approach. 4.ª ed. Philadelphia: Saunders Elsevier; 2009.
2. Carpenter M. Human neuroanatomy 4.ª ed. Saint Louis: Mosby; 1984.
3. Martirosyan N, Feuerstein J, Theodore N, Cavalcanti D, Spetzler R, Preul M. Blood supply and vascular reactivity of the spinal cord under normal and pathological conditions. J Neurosurg Spine. 2011;15(3):238–51.

LECTURAS RECOMENDADAS

1. Kandel E, Schwartz J, Jessell T. Principles of neural science. 4.ª ed. New York: McGraw–Hill; 2000.
2. Paxinos G, Mai J. The human nervous system. 2.ª ed. San Diego: Elsevier; 2004.
3. Haines D. Fundamental neuroscience for basic and clinical applications. 3.ª ed. New York: Elsevier; 2006.

CAPÍTULO 8



MENINGES

El encéfalo y el cordón espinal son estructuras muy delicadas que requieren protección especial. Esta protección está dada por el cráneo, las vértebras y las meninges. Las meninges (del griego meninx: membrana) son membranas de tejido conjuntivo que constituyen las cubiertas exteriores del neuroeje. Se disponen concéntricamente en torno a este y se alojan en el interior de la cavidad craneana y del conducto raquídeo. Existen tres capas de meninges (figura 8.1). La más externa es la duramadre, llamada también paquimeninge (del griego pachy: grueso), que está formada por tejido conjuntivo denso. La más interna es la piamadre (del latín pia: delicada), constituida por tejido conjuntivo laxo que se adhiere a la superficie del neuroeje. Entre estas, se encuentra la aracnoides, que también está formada por tejido conjuntivo laxo. Esta se adhiere a la superficie interior de la duramadre y desde allí envía prolongaciones llamadas trabéculas aracnoideas, que se fusionan con la piamadre y atraviesan el espacio subaracnoideo por donde circula el líquido cefalorraquídeo (LCR). La disposición de las trabéculas aracnoideas en dicho espacio ha sido comparada con una telaraña; de ahí su nombre de aracnoides, que se deriva del vocablo griego aracné: araña. La piamadre y la aracnoides tienen estructura histológica y origen embrionario similares, ya que ambas provienen de la cresta neural; por ello, se les llama en conjunto las leptomeninges (del griego leptos: blando). El LCR, que ocupa las cavidades ventriculares y el espacio subaracnoideo, ayuda a disminuir la tendencia de varias fuerzas —como la gravedad— a distorsionar el encéfalo.

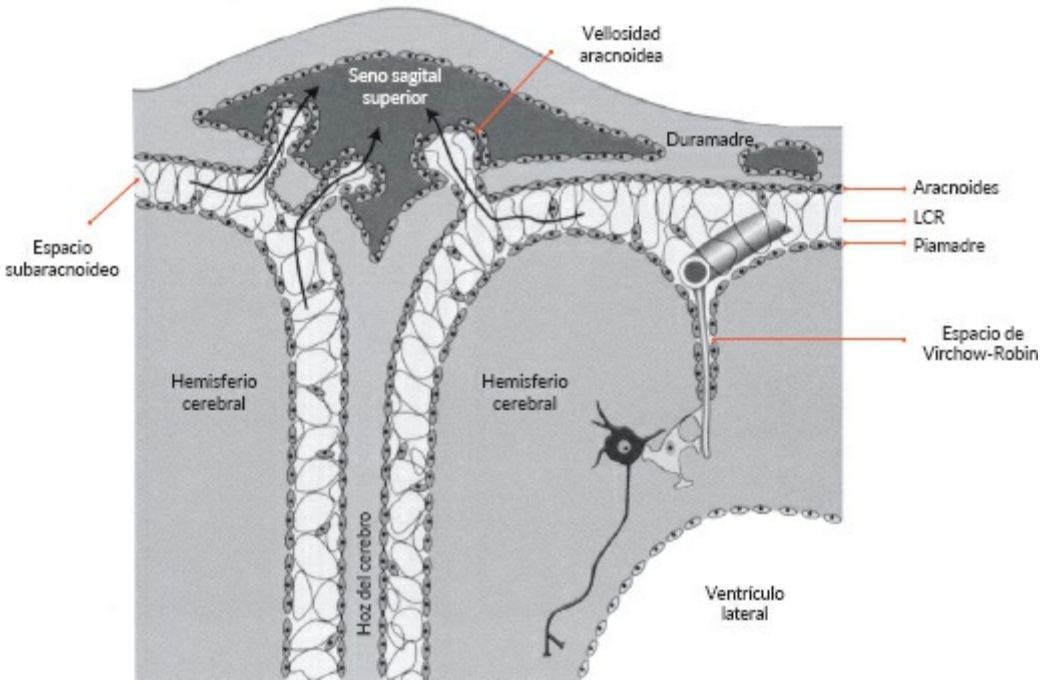


Figura 8.1. Esquema de corte coronal de los hemisferios cerebrales que muestra la disposición de las meninges. La duramadre forma la prolongación entre los hemisferios cerebrales conocida como falx cerebri u hoz del cerebro. Nótese que, en la zona donde se produce la prolongación, se forma el seno sagital (longitudinal) superior. La aracnoides está adherida a la cara interna de la duramadre y la piamadre tapiza la superficie de los hemisferios cerebrales. Entre la aracnoides y la piamadre, se observa el espacio subaracnoideo, que contiene líquido cefalorraquídeo, las trabéculas de la aracnoides y vasos sanguíneos. **Fuente:** adaptada de (1).

DURAMADRE

Para efectos de su descripción, se considerará la duramadre como dividida en dos: craneana y raquídea, aunque en realidad ambas son continuas.

Duramadre craneana

La duramadre craneana consta de dos capas: la capa externa o perióstica (figura 8.2), que está adherida a la superficie interna del cráneo y contiene gran cantidad de nervios y vasos sanguíneos; y la capa interna o meníngea, que está tapizada por células planas y no contiene vasos sanguíneos.

Figura 8.2. TAC helicoidal que muestra la duramadre adherida al cráneo. Se aprecia el seno sagital superior, los senos transversos y los vasos que irrigan la duramadre.

En ciertos lugares, estas dos capas se separan y forman los senos venosos durales y las prolongaciones meníngeas, que tabican la cavidad craneana en dos compartimientos: el superior o supratentorial y el inferior o infratentorial (figura 8.3). A continuación, se describen las prolongaciones durales:

Hoz del cerebro: es una prolongación vertical arqueada que ocupa el surco interhemisférico y se extiende desde la apófisis crista galli (adelante) hasta la protuberancia occipital interna (atrás). Su borde inferior o libre se relaciona con el cuerpo calloso (figura 8.3).

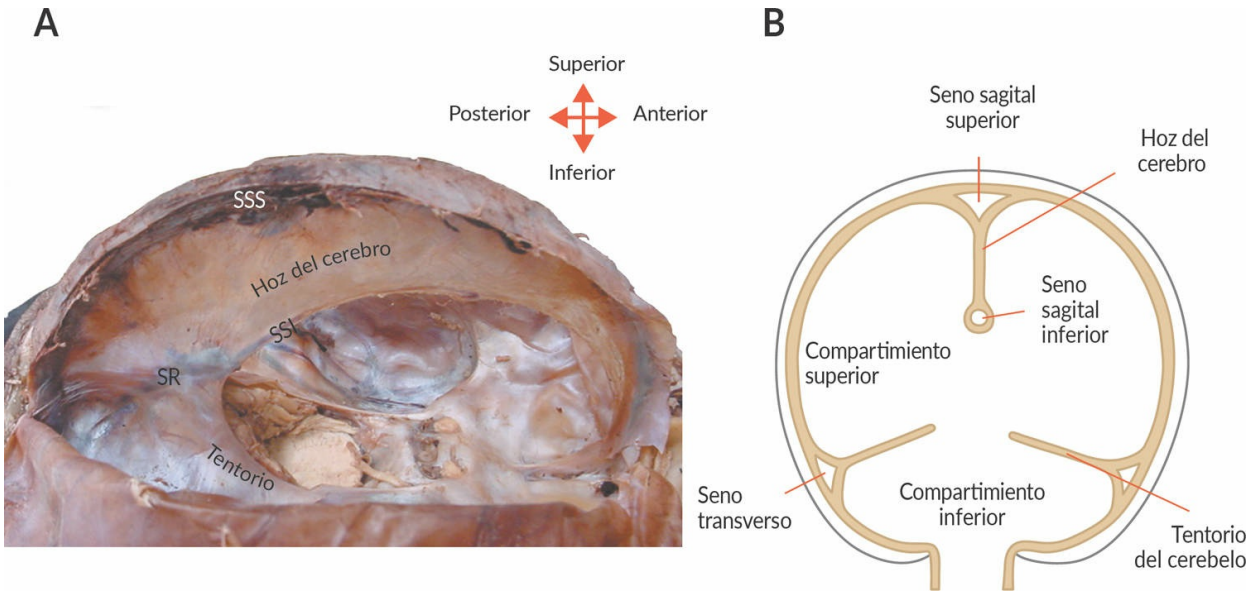


Figura 8.3A. Pieza anatómica en la que se han retirado los hemisferios cerebrales y se observa la hoz del cerebro y, en dirección horizontal, el tentorio del cerebelo. En el borde fijo o superior de la hoz se encuentra el seno sagital superior (SSS) y en la porción posterior del borde libre o inferior se observa el seno sagital inferior (SSI). En la unión de la hoz del cerebro con el tentorio del cerebelo

se forma el seno recto (SR). Los senos venosos durales reciben las venas corticales o superficiales del encéfalo. Estos senos tienen forma triangular en los cortes coronales y están tapizados con endotelio.

Figura 8.3B. Esquema de corte coronal cerebral que permite apreciar la hoz del cerebro, el tentorio del cerebelo y los senos venosos.

Tentorio del cerebelo: es una prolongación horizontal que separa la cara superior del cerebelo de los lóbulos occipitales. Se inserta en la cresta superior de la porción petrosa del hueso temporal, cursa por encima del cerebelo y se inserta en el canal horizontal del hueso occipital. Los bordes libres del tentorio forman la incisura o escotadura tentorial, que alberga el mesencéfalo (figura 8.4).

De esta forma, la hoz del cerebro divide la cavidad craneana en dos compartimentos llamados supratentoriales, donde se ubican los hemisferios cerebrales, y el tentorio del cerebelo forma un solo compartimento llamado posterior, infratentorial o fosa posterior, donde se encuentra el cerebelo y una parte del tronco cerebral (figura 8.5). El mesencéfalo pasa a través de la incisura tentorial.

Hoz del cerebelo: es una pequeña prolongación medial caudal al tentorio. Su borde libre se relaciona con el vermis del cerebelo. Su borde fijo se inserta en la línea occipital interna del hueso occipital y da lugar al seno occipital (figura 8.6).

Tentorio de la silla turca: llamado también diafragma de la silla, es una extensión de la duramadre que se inserta en las apófisis clinoides anteriores y posteriores y forma el techo de la fosa pituitaria. Está perforado por el infundíbulo, que termina en la glándula hipófisis. Al retirar el infundíbulo, se observa el orificio o diafragma del tentorio. El tentorio de la silla se prolonga hacia delante con la duramadre de la fosa craneana anterior, hacia atrás, con el dorso de la silla turca y el clivus, y hacia los lados, con la pared medial del seno cavernoso.

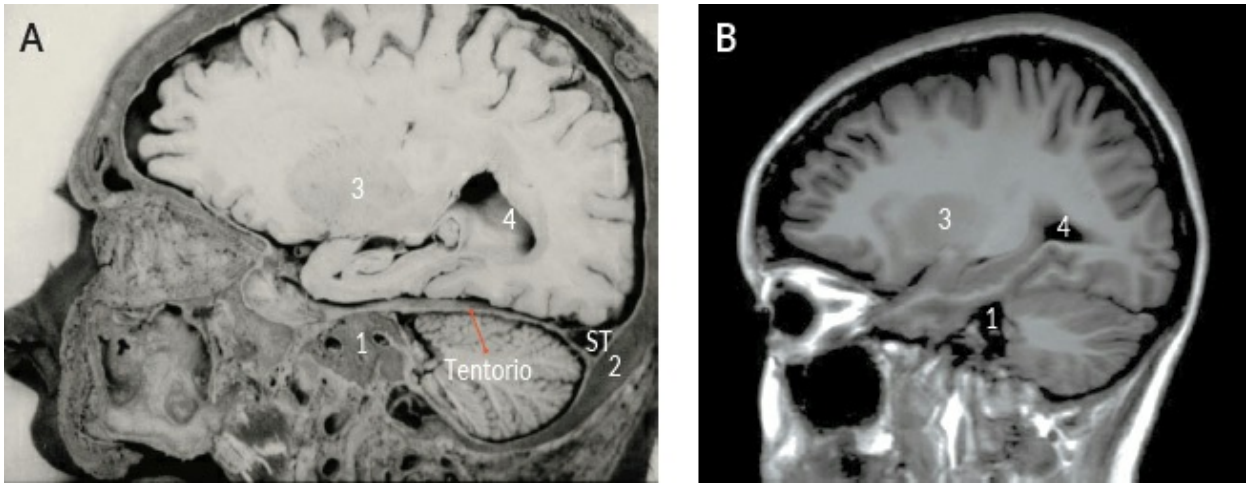


Figura 8.4A. Pieza anatómica de corte parasagital encefálico que muestra el tentorio del cerebelo. 1: porción petrosa del hueso temporal; 2: protuberancia occipital interna del hueso occipital; 3:

putamen; 4: atrio ventricular; ST: seno transverso.
Figura 8.4B. IRM en T1 (T1–WI) de corte parasagital encefálico con algunas estructuras descritas en la figura anterior. Se aprecia el espacio ocupado por el tentorio del cerebelo.

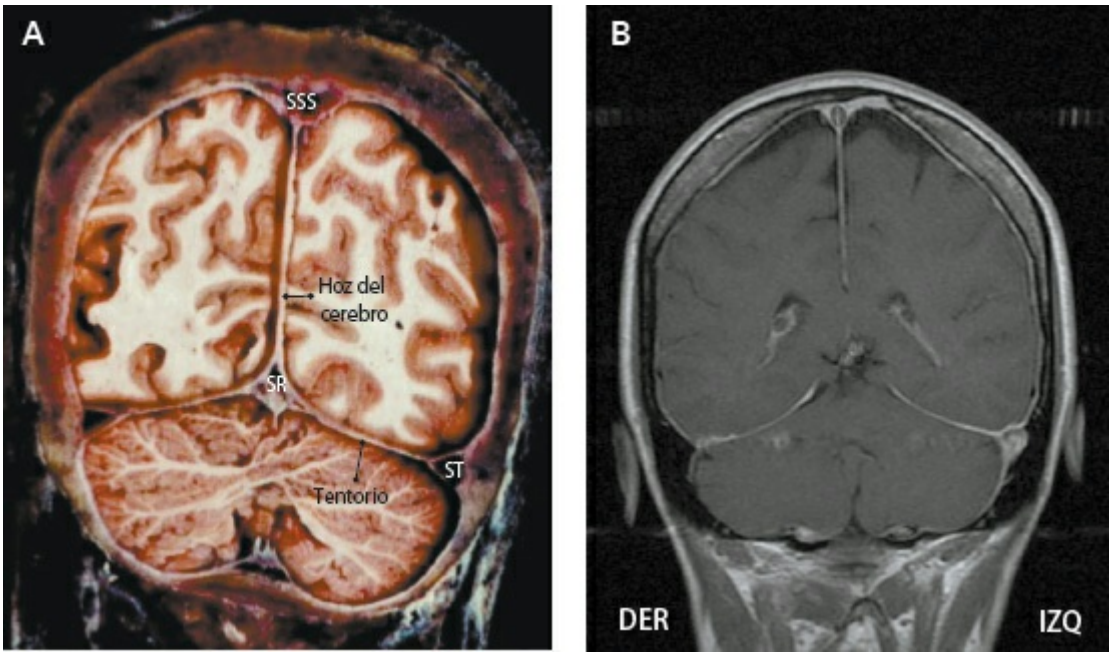


Figura 8.5A. Pieza anatómica de corte coronal que muestra la hoz del cerebro y el tentorio del cerebelo formando los compartimentos ya mencionados. SSS: seno sagital (longitudinal) superior; SR: seno recto; ST: seno transverso.
Figura 8.5B. IRM en T1 (T1–WI) con contraste de corte coronal en la que se identifican las estructuras señaladas en la imagen anterior.

Los senos cavernosos se localizan a ambos lados de la silla turca, formando las paredes laterales de la fosa pituitaria (figura 8.7). Se extienden desde la fisura orbitaria superior o hendidura esfenoidal hasta el dorso de la silla turca. Cada seno cavernoso está formado por cuatro paredes durales: lateral, medial, superior (techo) y posterior. La pared lateral está constituida por las dos capas de duramadre que se prolongan en el piso de la fosa media del cráneo y en el tentorio del cerebelo. La pared medial forma el límite lateral de la fosa pituitaria y se adhiere al cuerpo del esfenoides. El techo se encuentra entre los extremos superiores de las paredes lateral y medial, y se relaciona con las apófisis clinoides anteriores y posteriores. La pared posterior se continúa con la duramadre que recubre el clivus y el peñasco del temporal. Dentro del seno cavernoso se encuentra la arteria carótida interna, el par craneano vi (nervio abducens) y algunas fibras simpáticas. En la pared lateral se encuentran el par craneano III (nervio oculomotor), el par craneano iv (nervio troclear), la primera rama del nervio trigémino o par craneano v (nervio oftálmico) y la segunda rama del nervio trigémino (nervio maxilar).

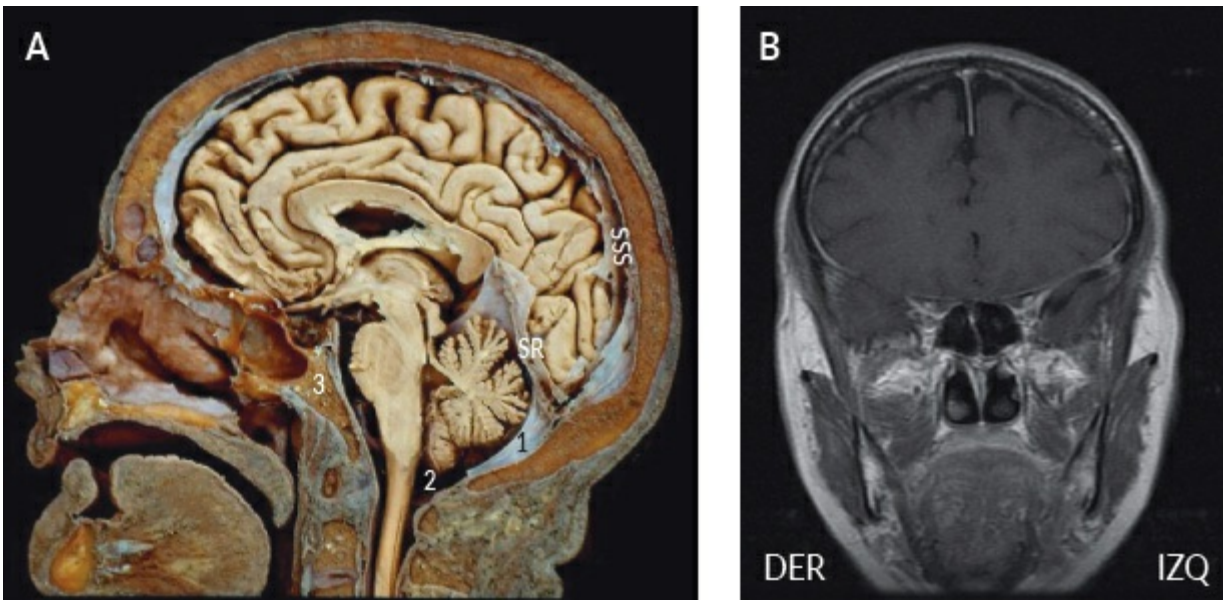


Figura 8.6A. Pieza anatómica de corte sagital encefálico. SSS: seno sagital superior; SR: seno recto; 1: hoz del cerebelo; 2: cisterna magna. Nótese que la silla turca está tapizada por duramadre y continúa hacia abajo en la lámina basilar del occipital (3) y el conducto raquídeo.
Figura 8.6B. IRM en T1 (T1–WI) de corte coronal cerebral en el que se observa la duramadre alrededor de los hemisferios cerebrales y la hoz del cerebro en el surco interhemisférico.

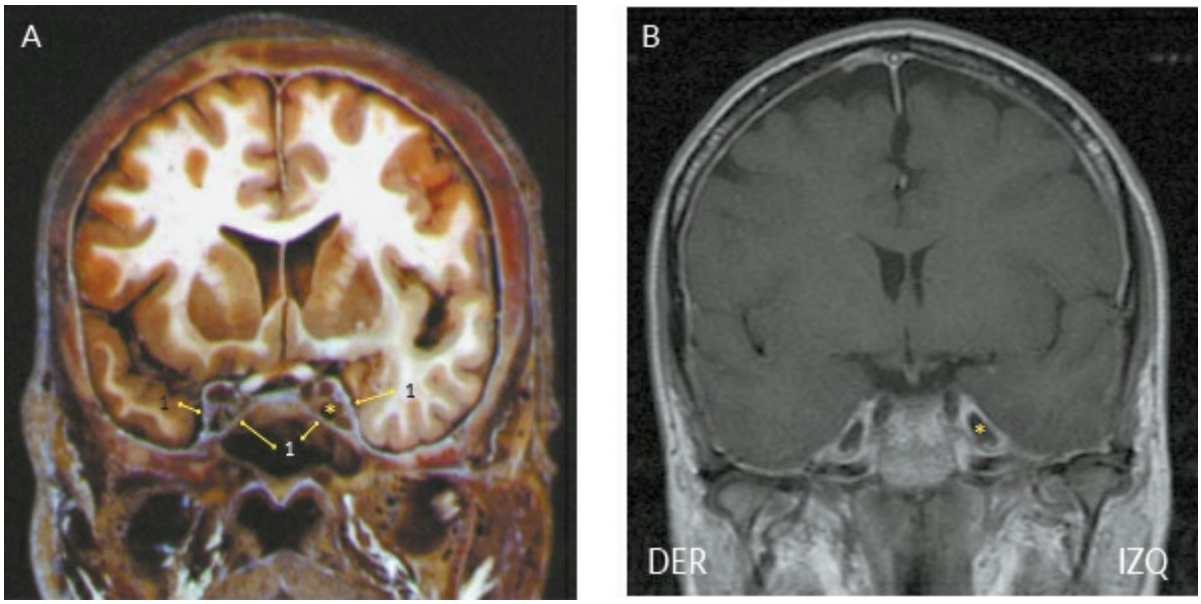


Figura 8.7A. Pieza anatómica de corte coronal que muestra la duramadre adherida a la cara interna de los huesos del cráneo y rodeando los hemisferios cerebrales, la hoz del cerebro, el seno sagital superior y los senos cavernosos (1), que forman las paredes laterales de la silla turca. Dentro del seno cavernoso se aprecia la arteria carótida interna (asterisco).
Figura 8.7B. IRM en T1 (T1–WI) de corte coronal con medio de contraste en la que se observan las mismas estructuras de la imagen anterior.

Duramadre raquídea

La duramadre raquídea o espinal es una membrana única, ya que no tiene el componente perióstico. Es la continuación de la duramadre craneana y está

separada del periostio de las vértebras por el espacio epidural, que contiene tejido graso y plexos venosos vertebrales. La duramadre raquídea se extiende como un tubo cerrado desde los bordes del agujero magno hasta la segunda vértebra sacra. Su terminación caudal constituye el fondo de saco dural, envuelve el filum terminale y se prolonga como el ligamento coccígeo que se inserta en el cóccix (figura 1.1).

ARACNOIDES

La aracnoides es una membrana no vascularizada que está constituida por varias capas de células planas mezcladas con fibras de colágeno. Se localiza entre la duramadre y la piamadre; está completamente adherida a la capa meníngea de la duramadre y sus prolongaciones trabeculares se extienden hasta la piamadre. El espacio entre la aracnoides y la piamadre contiene LCR y se conoce como espacio subaracnoideo. Este espacio suele presentar variaciones locales en su extensión; por ejemplo, es estrecho sobre la convexidad del cerebro (figura 8.8).

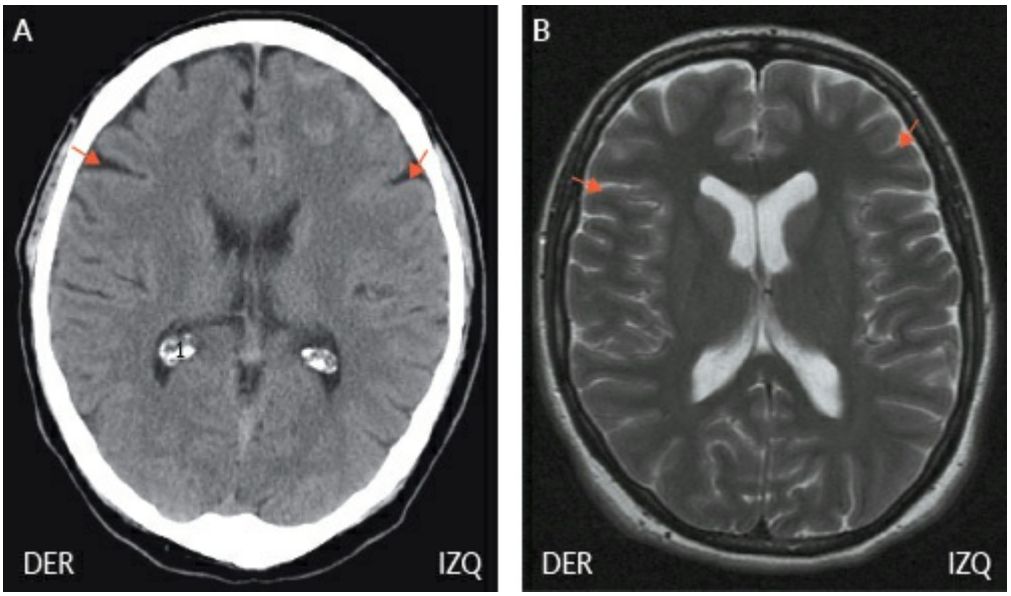


Figura 8.8A. TAC de corte transversal cerebral que muestra el LCR de color gris oscuro (hipodenso) presente en el espacio subaracnoideo y los ventrículos laterales (►). Se observa la calcificación de los plexos coroideos (1).
Figura 8.8B. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal similar al de la imagen anterior. Nótese el LCR que ocupa los surcos (►) y las cavidades ventriculares.

En la base del encéfalo y alrededor del tronco cerebral, el espacio subaracnoideo es más amplio y forma las cisternas subaracnoideas. La de mayor volumen a nivel endocraneano es la cisterna cerebelomedular o magna, que se localiza entre el cerebelo y la cara posterior de la médula (figuras 8.6A y 8.10A). Esta cisterna recibe el LCR del cuarto ventrículo a

través de los agujeros laterales (Luschka) y el agujero medial (Magendie). Otras cisternas de menor tamaño son: la cisterna póntica, que rodea la cara anterior del puente; la cisterna interpeduncular, localizada entre los dos pedúnculos cerebrales; la cisterna quiasmática y la cisterna superior o ambiens (figura 8.9). Esta última, que rodea las partes posterior, superior y lateral del mesencéfalo, alberga la gran vena cerebral (de Galeno), las arterias cerebrales posteriores y las arterias cerebelosas superiores.

A nivel raquídeo se encuentra la cisterna lumbar, que se extiende desde el cono medular (L1) hasta el fondo de saco dural (S2). Esta cisterna alberga el filum terminale y las raíces nerviosas que forman la cauda equina (figura 8.10). De esta cisterna se obtiene LCR cuando se realiza una punción lumbar.

En las regiones adyacentes al seno sagital superior, la aracnoides presenta evaginaciones que atraviesan la duramadre, se introducen en el seno venoso y forman las granulaciones aracnoideas, que están constituidas por las vellosidades aracnoideas. Se considera que estas vellosidades drenan la mayor parte del LCR hacia el sistema venoso (figura 8.11). Las granulaciones aracnoideas funcionan como una válvula unidireccional a presión, que mueve el LCR solamente hacia los senos venosos, nunca en dirección contraria. Esto es posible gracias a que la presión hidrostática del LCR es mayor que la de los senos venosos. Si el gradiente de presión se invierte; es decir, si se aumenta la presión dentro del seno venoso —como cuando se realiza la maniobra de Valsalva al levantar un objeto pesado—, el líquido del seno venoso no pasa a la vellosidad aracnoidea.

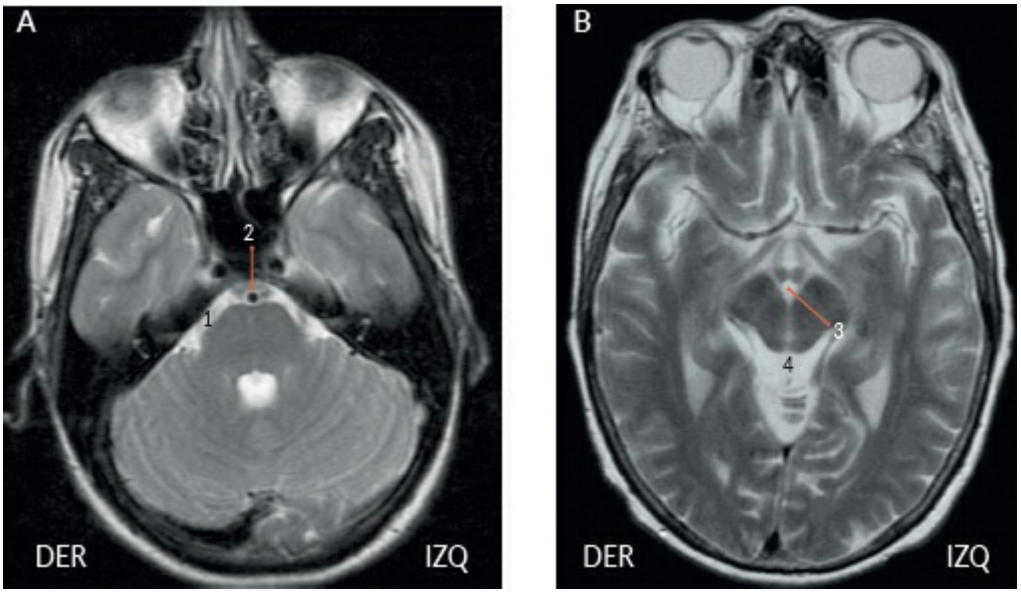


Figura 8.9A. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal a nivel del puente. 1: cisterna póntica; 2: arteria basilar.

Figura 8.9B. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal a nivel del mesencéfalo. 3: cisterna interpeduncular; 4: cisterna superior o ambiens.

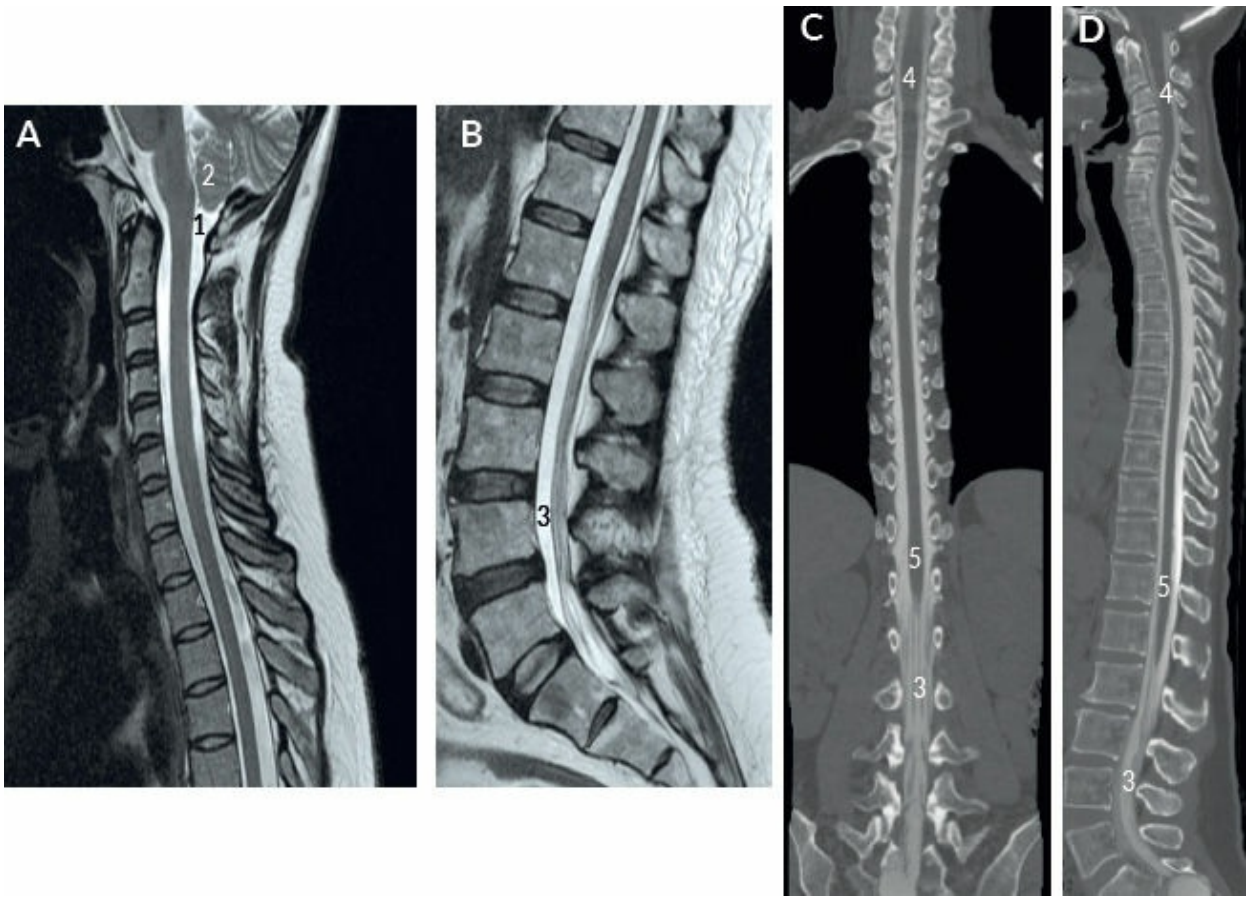


Figura 8.10A. IRM en T2 (T2–WI) de corte sagital a nivel de la unión bulboespinal en la que se aprecia la cisterna magna o cerebelomedular (1), entre la cara posterior de la médula y la amígdala cerebelosa (2). Se observa la continuación del espacio subaracnoideo alrededor del cordón espinal y su engrosamiento cervical.

Figura 8.10B. IRM en T2 (T2–WI) de corte sagital a nivel lumbar en la que se observa la cisterna lumbar (3) —que alberga la cola de caballo—, el cono medular y el filum terminale.

Figura 8.10C. Mielo–TAC de corte coronal de la columna vertebral en la que se identifica el espacio subaracnoideo, la cisterna lumbar con la cola de caballo (3), el engrosamiento cervical (4) y el engrosamiento lumbar (5) del cordón espinal.

Figura 8.10D. Mielo–TAC de corte sagital de la columna vertebral en el que se identifican las estructuras señaladas en la imagen anterior.

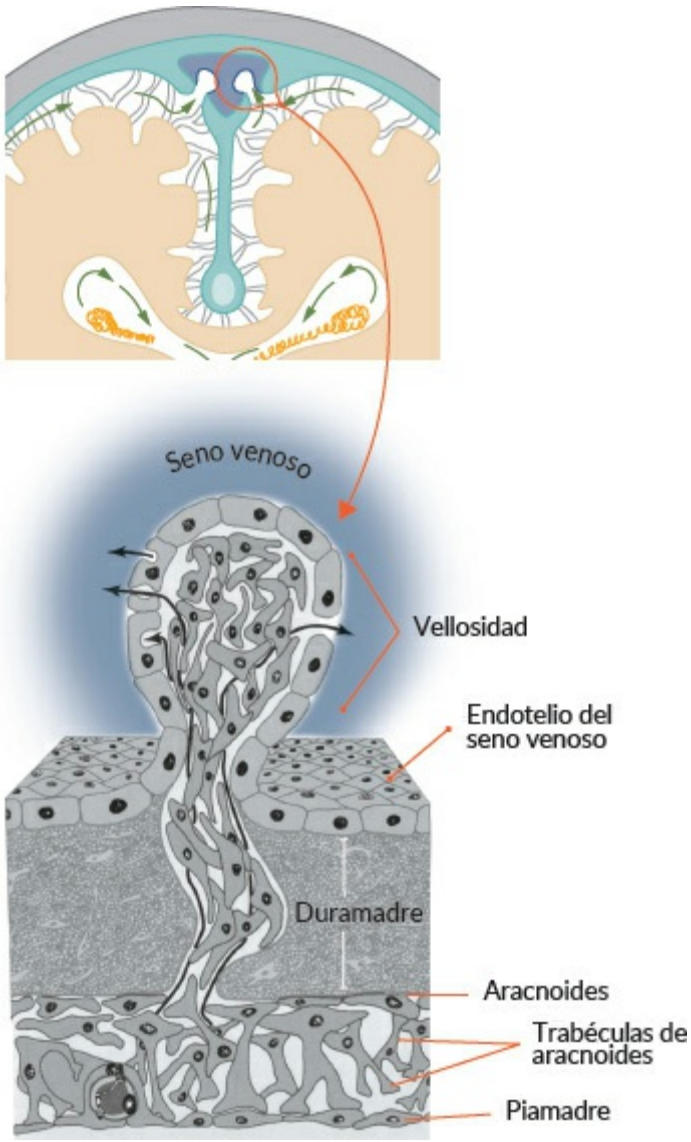


Figura 8.11. Esquema de una vellosidad aracnoidea formada solamente por una capa de células aracnoideas y el endotelio del seno venoso. Con el envejecimiento, las granulaciones aracnoideas suelen aumentar de tamaño y número y calcificarse (cuerpos de Pacchioni).

PIAMADRE

La piamadre tiene una capa interna llamada pía íntima y una capa externa llamada epipía. La pía íntima está constituida de fibras elásticas y reticulares que se adhieren a toda la superficie del neuroeje y siguen sus contornos. Las arterias y venas del encéfalo transcurren por el espacio subaracnoideo antes de penetrar en el tejido nervioso. En el lugar donde los vasos sanguíneos penetran o abandonan el neuroeje, la pía íntima se invagina y forma el espacio perivascular o espacio de Virchow–Robin (figura 8.1). La íntima es avascular y deriva sus nutrientes del LCR y del tejido nervioso subyacente.

La epipía está compuesta de fibras colágenas que se continúan con las trabéculas aracnoideas. La diferenciación de estas dos membranas no es

fácil, por lo que algunos autores prefieren llamarlas complejo pía–aracnoides. Sobre la superficie lateral de los hemisferios cerebrales no se encuentra epipía. El cordón espinal se adhiere al tubo dural mediante una serie de prolongaciones o bandas triangulares de la epipía llamadas ligamentos dentados. La base de cada ligamento se localiza en el cordón lateral, entre las raíces anteriores y dorsales, y sus vértices se unen firmemente a la aracnoides y a la superficie interna de la duramadre. Estos ligamentos están presentes a lo largo de todo el cordón espinal. A nivel del cono medular, la epipía forma el filum terminale, que se confunde con el ligamento coccígeo.

LÍQUIDO CEFALORRAQUÍDEO

El LCR es transparente, inodoro e incoloro. Contiene proteínas, glucosa, sodio y entre 1 y 5 linfocitos por milímetro cúbico. El LCR permite que el neuroeje flote, lo que reduce el peso efectivo. También funciona como protección contra los movimientos bruscos y ayuda a remover metabolitos que pueden ser dañinos para el tejido nervioso. Sirve como medio de transporte a varias hormonas polipéptidas secretadas por el hipotálamo que se dirigen a sitios remotos del neuroeje. El pH del LCR afecta la ventilación pulmonar y el flujo vascular cerebral. Cerca del 70 % de este líquido es secretado por los plexos coroideos localizados en los ventrículos. El 30 % restante se deriva del agua producida por el metabolismo.

El LCR producido en los ventrículos laterales pasa al tercer ventrículo a través de los agujeros interventriculares y fluye hacia el cuarto ventrículo a través del acueducto cerebral. De allí, pasa al espacio subaracnoideo a través de los agujeros laterales (en los recesos laterales) y el agujero medial (en el velo medular inferior), en donde circula hasta ser reabsorbido por las vellosidades aracnoideas. El volumen total aproximado del LCR en los ventrículos y el espacio subaracnoideo es de 140 ml. El LCR es absorbido y secretado de forma continua, y su producción neta en 24 horas es entre 400 y 500 ml. La tabla 8.1 describe algunas características del LCR en sujetos normales o en pacientes con diversas condiciones médicas. Se debe tener en cuenta que hay variabilidad para casos específicos.

Tabla 8.1. Características del LCR en diferentes condiciones.

LCR	Presión	Aspecto	Serie blanca	Serie roja	Proteinas	Glucosa
Normal	< 20 cm (cristal de roca)	Transparente	< 5 Linfocitos	< 5 glóbulos rojos	15 a 45 mg/dl	50 % de la glicemia
Meningitis viral	> 20 cm	Transparente	↑↑ Linfocitos	<5 o ↑	↑↑	Normal o ↓↓
Meningitis bacteriana aguda	>20 cm	Turbio	↑↑↑ Polimorfonucleares	<5	↑↑	↓↓
Meningitis crónica (tuberculosis, hongos)	≥20 cm	Transparente	↑↑ Linfocitos	<5	↑↑	↓↓↓
Meningitis por parásitos (neurocisticercosis)	≥20 cm	Transparente	↑ Eosinófilos	<5	↑↑	↓↓
Hemorragia subaracnoidea	>20 cm	Xantocrómico	↑↑	↑↑↑	↑↑	Normal

Ejercicios clínicos

Caso 1

Un paciente de 74 años sufrió un accidente automotor y chocó contra un árbol. En esa oportunidad, el examen físico no sugirió déficit neurológico y la TAC no mostró anormalidad. Dos meses después, el paciente ingresa a urgencias porque súbitamente presenta dificultad para hablar y disminución en la fuerza (paresia) de la extremidad superior derecha. Con la sospecha de un evento cerebrovascular agudo, se realiza IRM (figura 8.12). Antes de leer los hallazgos de la IRM, ¿qué observa?

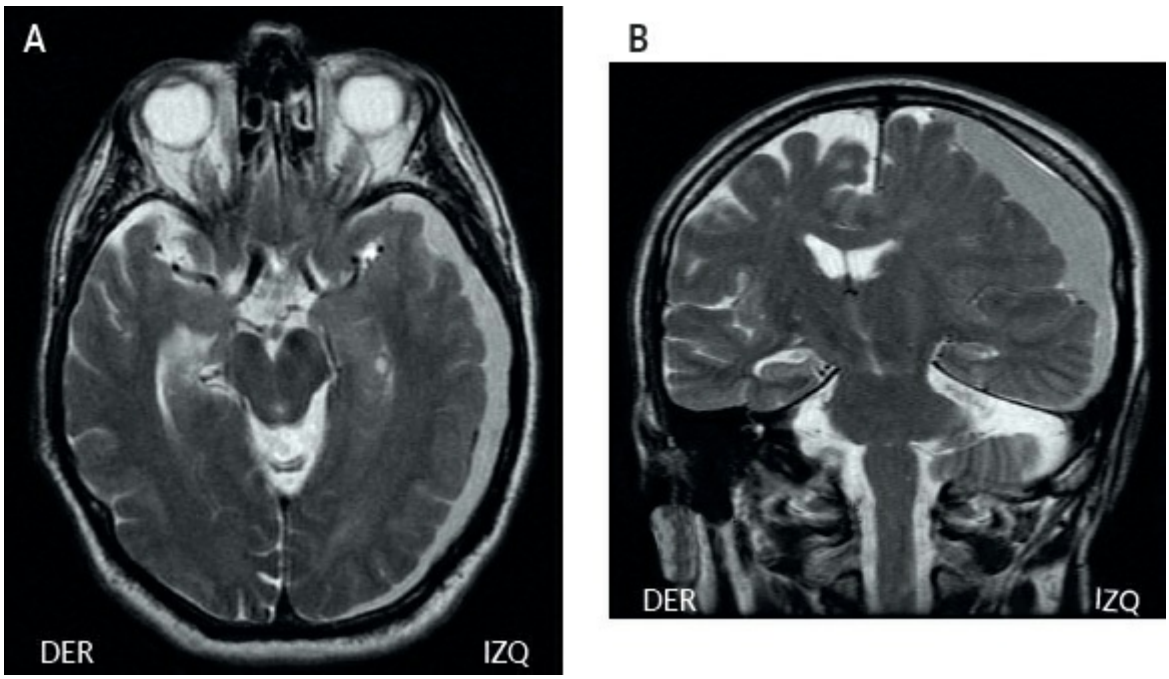


Figura 8.12A. IRM en T2 (T2–WI) de corte transversal que muestra colección de líquido por fuera del hemisferio izquierdo no correspondiente a LCR dada su intensidad. Este hallazgo es compatible con hematoma subdural.
Figura 8.12B. IRM en T2 (T2–WI) de corte coronal que muestra el desplazamiento del cerebro por el hematoma subdural. Compare la posición del septum lúcido en relación con la hoz del cerebro.

Caso 2

Un paciente de 44 años súbitamente presenta cefalea intensa acompañada de náuseas y vómito. Nunca antes había sufrido un episodio similar en su vida. En el examen neurológico, el paciente se encontró alerta, sin déficit motor ni sensitivo, pero mostró signos meníngeos. Se realizó TAC cerebral simple (figura 8.13). Antes de leer la descripción de las imágenes, ¿qué observa?

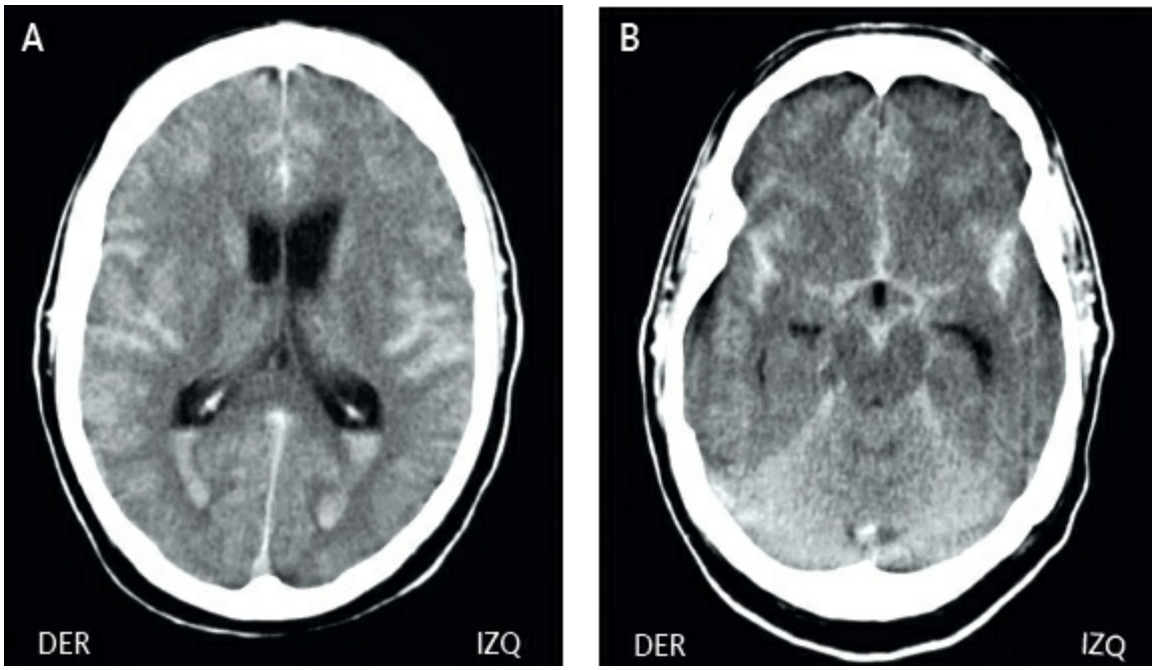


Figura 8.13A. TAC cerebral simple de corte transversal que muestra los surcos ocupados por sustancia hiperdensa, que corresponde a sangre en el espacio subaracnoideo. Este hallazgo es compatible con hemorragia subaracnoidea.
Figura 8.13B. TAC cerebral simple de corte transversal a una altura inferior a la de la imagen anterior. Se observa hiperdensidad en los surcos que corresponde a hemorragia subaracnoidea. Nótese la diferencia entre el LCR de las cavidades ventriculares y el espacio subaracnoideo.

Caso 3

Una paciente de 57 años de repente presenta movimientos anormales en la extremidad derecha que sugieren crisis convulsivas. Con la descripción del cuadro clínico se realiza IRM (figura 8.14). ¿Qué hallazgos observa?

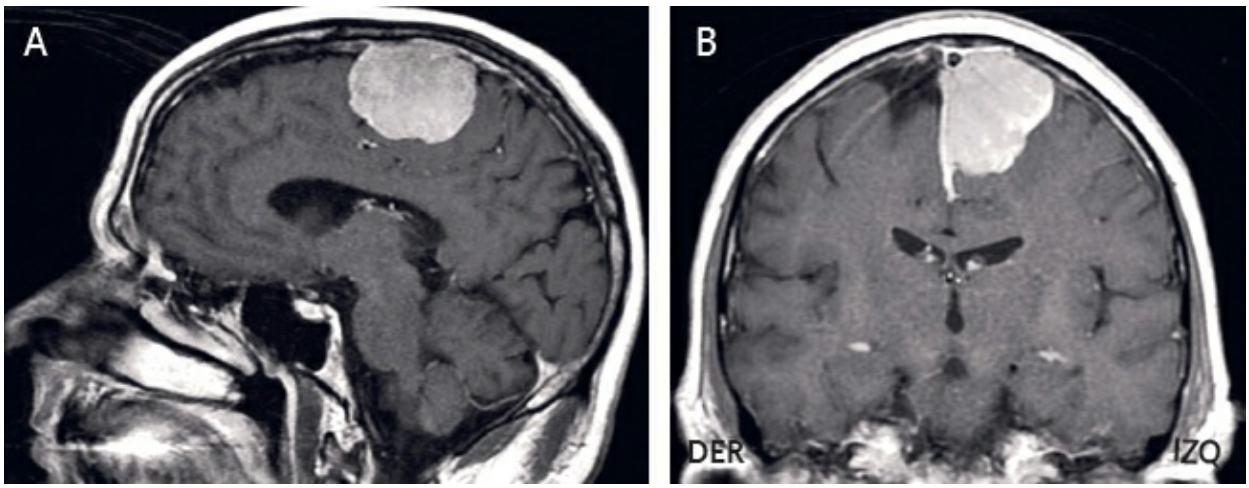


Figura 8.14A. IRM en T1 (T1–WI) de corte sagital con contraste que muestra lesión tumoral a la altura del giro paracentral compatible con meningioma de la hoz del cerebro.
Figura 8.14B. IRM en T1 (T1–WI) de corte coronal con contraste que muestra lesión tumoral compatible con meningioma de la hoz del cerebro a nivel del surco interhemisférico. Nótese el seno sagital superior con señal normal.

Caso 4

Un paciente de 64 años en los últimos 6 meses ha venido presentando episodios de corta duración en los que pierde contacto con el medio y arresto del lenguaje. El examen neurológico es normal. Por la historia clínica se realiza imr del cerebro (figura 8.15). ¿Qué hallazgos observa?

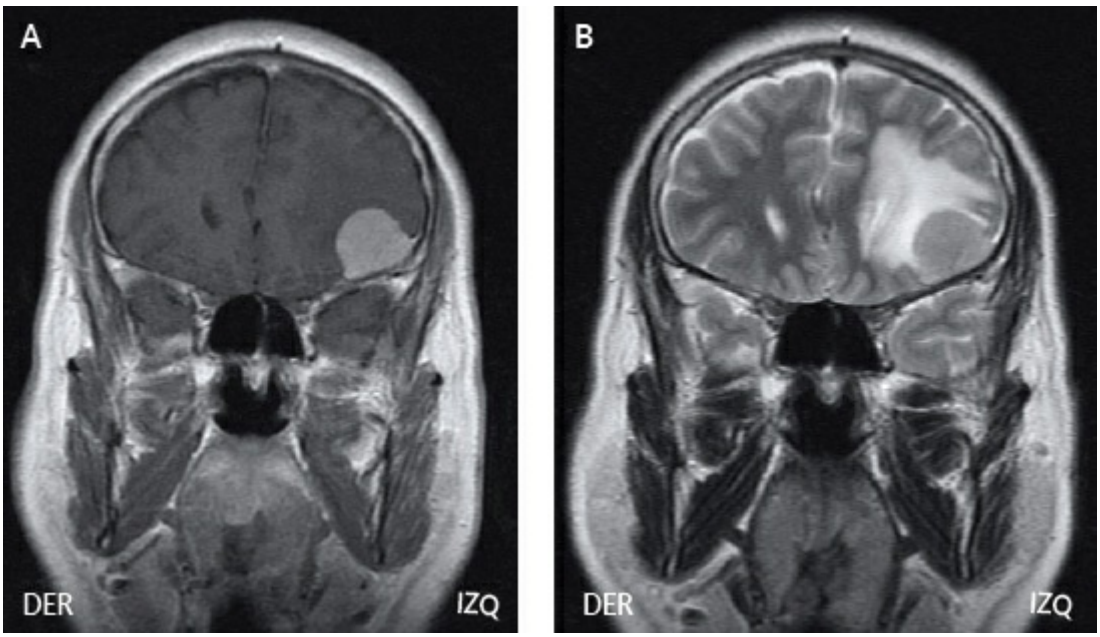


Figura 8.15A. IRM en T1 (T1–WI) con medio de contraste en la que se detecta masa ovoidea en la cara inferior del hemisferio izquierdo compatible con meningioma.
Figura 8.15B. IRM en T2 (T2–WI) en la que se aprecia edema perilesional (alrededor del meningioma) en el hemisferio izquierdo. Los hallazgos explican los síntomas que presenta el paciente.

REFERENCIAS

1. Hamilton W (editor). Textbook of human anatomy. 2.ª ed. Saint Louis: Mosby; 1976.

LECTURAS RECOMENDADAS

1. Carpenter MB. Core text of neuroanatomy. 4.ª ed. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins; 1991.
2. Haines D. Fundamental neuroscience for basic and clinical applications. 3.ª ed. New York: Elsevier; 2006.
3. Brodal P. The central nervous system, structure and function. New York: Oxford University Press; 1992.
4. Heimer L. The human brain and spinal cord. Functional neuroanatomy and dissection guide. 2.ª ed. New York: Springer–Verlag; 1995.

CAPÍTULO 9

EVOLUCIÓN DEL SISTEMA NERVIOSO

El estudio de la evolución del sistema nervioso exige algunas precisiones sobre la forma en que se planteará. En primer lugar, se hará una revisión general acerca del origen y desarrollo del sistema nervioso en los metazoos (animales desde las esponjas), haciendo énfasis en la aparición y evolución de los sistemas nerviosos centrales. Luego, se tratará el sistema nervioso de los organismos Bilateria (de simetría bilateral), que se agrupan en protóstomos —moluscos, cefalópodos e insectos— y deuteróstomos —equinodermos (estrellas de mar), cordados que poseen notocorda y vertebrados—. Se describirán sus sistemas centrales de forma general y se compararán con los de los vertebrados.

La mayor parte del capítulo se enfocará en la evolución del sistema nervioso de los vertebrados, principalmente, de mamíferos, primates y homíninos, el grupo taxonómico al cual pertenece el Homo sapiens. El estudio de la evolución del sistema nervioso en los vertebrados es complejo, dado que hay cambios generales con tendencias —como el relacionado con el tamaño absoluto y relativo del encéfalo—, cambios en áreas específicas del sistema nervioso central (snc) y cambios funcionales. Así pues, se hará una descripción general de estos tres tipos de cambios, señalando algunos aspectos sobre cómo han generado el sistema nervioso del ser humano, que le permite a este incluso tratar de explicar su propia evolución.

ORIGEN DEL SISTEMA NERVIOSO

La función general del sistema nervioso (sn) es controlar las funciones vitales de los animales y, así, regular su conducta en un ambiente dado. Esto se lleva a cabo mediante la producción y transmisión de señales eléctricas a través de las sinapsis entre dos células vecinas. La estructura del sn está constituida por dos tipos celulares: las neuronas, que son las encargadas de generar y transmitir los impulsos nerviosos, y las células gliales, que prestan soporte a aquellas y contribuyen con su homeostasis.

Aunque los demás organismos carecen de este tipo de sistema, es evidente que muchas características de las células nerviosas —como la diferencia de potencial eléctrico de la membrana, la excitación de la membrana por distintas señales provenientes del medio, la capacidad de modificar su

metabolismo mediante señales ligando–receptor, la modificación de la forma y el movimiento celulares, y otras más especializadas como la fototaxis (estimulación por luz)— son propias de plantas, hongos y organismos unicelulares, tanto procariotas —que no poseen núcleo ni organelos celulares — como eucariotas —que poseen núcleo y organelos celulares—. En los unicelulares eucariotas, hay canales iónicos de potasio y calcio modulados por voltaje en las membranas celulares. Los canales de sodio solamente aparecen en el grupo de los Cnidaria.

Si se estudian los organismos actuales para identificar cuáles poseen SN y para deducir el taxón en el cual apareció el primer SN, se concluye que los únicos organismos con un sistema claramente establecido son los animales (metazoos). Sin embargo, las esponjas (Porifera), que son los metazoos más simples, carecen de uno. En este grupo, algunas células forman un epitelio externo y uno interno, y otras se sitúan entre las dos capas. Estas células tienen características de miocitos, pues se activan por estímulos, aunque no es posible identificar transmisión nerviosa.

Si se revisa la filogenia de los metazoos (figura 9.1), se observa que los organismos de taxones que no presentan simetría bilateral (Ctenophora y Cnidaria) tienen un sistema nervioso simple, difuso y sin una organización central. Sin embargo, los Cnidaria móviles, como las medusas, tienen dos anillos nerviosos formados por neuronas que se extienden a la «sombrilla» y a los tentáculos. Las sinapsis en estos organismos son eléctricas en su mayoría, aunque se han identificado algunas químicas. En el resto de los grupos metazoos —todos denominados Bilateria por poseer simetría bilateral — hay un especialización del SN en la que se puede reconocer un sistema nervioso central y uno periférico. Además, aparecen los canales de sodio en las membranas, lo cual es importante en el desarrollo de sistemas nerviosos complejos.

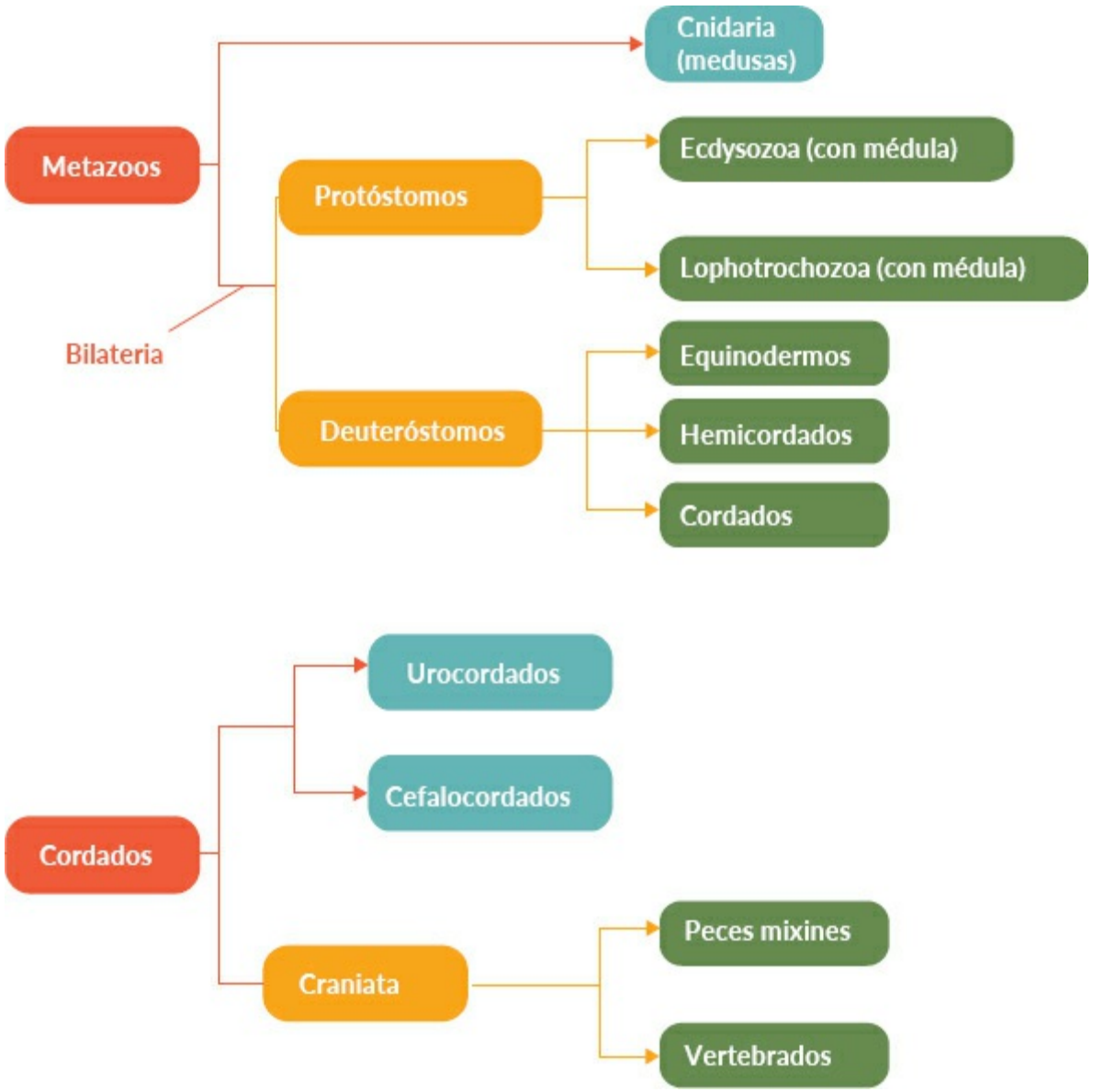


Figura 9.1. Árbol filogenético de los metazoos.

SISTEMA NERVIOSO EN PROTÓSTOMOS

Los protóstomos constituyen la mayor parte de los animales que habitan la tierra, incluyendo la mayoría de los invertebrados. Se caracterizan porque durante el desarrollo embrionario la boca se forma antes que el ano a partir del blastoporo. En los deuteróstomos, el ano se desarrolla antes que la boca. Aunque muchos protóstomos tienen sistemas nerviosos complejos, hay algunos que poseen sistemas muy simples, semejantes a los de las hidras. Un ejemplo es el de los platelmintos, una posible evolución secundaria de sistemas ancestrales más complejos.

La organización del SN de estos organismos es variable, pero en general,

tienen un SNC ubicado hacia el extremo cefálico. En los más simples, este sistema está formado por un ganglio supraesofágico del cual emergen dos cordones nerviosos ventrales. En los protóstomos, los cordones nerviosos están ubicados ventralmente, mientras que en los deuteróstomos son dorsales. La localización de los cordones depende de moléculas homólogas que se ubican en diferentes lugares de los embriones.

En muchos grupos, el sn está asociado con estructuras sensoriales complejas, como mecanorreceptores, ojos simples y complejos, etc. También se observa una tendencia evolutiva a subdividir el SNC cefálico en varios ganglios o masas neuronales, especialmente en animales que poseen estructuras sensoriales más complejas como los moluscos y artrópodos. Los protóstomos se clasifican en dos grupos: los Lophotrochozoa, que no presentan muda de esqueleto externo (anélidos y moluscos), y los Ecdysozoa, que sí presentan muda de exoesqueleto (artrópodos).

Protóstomos Lophotrochozoa

Anélidos: en las lombrices de tierra y las sanguijuelas, el SN presenta un anillo o ganglio cerebral (supraesofágico) que da origen a dos cordones ventrales. En cada segmento hay un ganglio par. En especies predadoras, el ganglio cerebral tiene tres partes, pero no se conoce su relación evolutiva con otros sistemas subdivididos como el de los insectos. Algunos grupos poseen fibras nerviosas gigantes con velocidades de conducción muy altas. Los anélidos tienen órganos sensoriales variados.

Moluscos: son animales invertebrados que poseen un SN más complejo. Su patrón básico es un sistema tetraneural, conformado por un ganglio cerebral, dos cordones pleurovisceral dorsales y dos ventrales (pedales).

a. Gastrópodos: este grupo incluye los caracoles y las babosas. Poseen cuatro cordones, seis pares de ganglios viscerales —como máximo— y uno impar. El ganglio cerebral es par. Los cordones están unidos por comisuras que se conectan alrededor del esófago y procesan información de la vista, equilibrio, tacto, piel, labios, cabeza, etc. Tienen un ganglio bucal debajo del esófago sin conexiones. Poseen ganglios pleurales y pedales.
b. Bivalvos: comprende las almejas, ostras, mejillones y vieiras. Su SN es simplificado de forma secundaria. Poseen tres pares de ganglios, de los cuales el visceral es el mayor.
c. Cefalópodos: conformado por sepias, calamares y pulpos. Poseen un SNC muy complejo, en especial los pulpos. Los ganglios se fusionan para formar un «cerebro» con lóbulos alrededor del esófago. El pulpo posee 550 millones de neuronas. De estas, 350 millones están en los tentáculos, 120 a 180 millones en los lóbulos ópticos y 48 millones conforman el cerebro, el

cual rodea el esófago con 38 lóbulos.

Protóstomos Ecdysozoa

Nemátodos: constituido por las lombrices redondas como las Áscaris. Su SN es simple, probablemente porque la mayoría son de vida parásita. Poseen un anillo alrededor del esófago al que se conectan ganglios. Tienen entre 4 y 12 cordones ventrales conectados irregularmente y fibras nerviosas que van desde el anillo a los órganos sensoriales.
Artrópodos: son los animales más numerosos, se calcula que puede haber unos 10 millones de especies, aunque en la actualidad se contabilizan 1.2 millones. El patrón general de su SN consiste en un cordón par ventral dispuesto en forma de escalera. Los ganglios cefálicos se fusionan y forman estructuras complejas. Existen varios grupos de artrópodos que se agrupan de forma general en no mandibulados (quelicerados) y mandibulados (crustáceos, miriápodos y hexápodos o insectos).

a. Quelicerados: formado por arañas, escorpiones y ácaros. Su aparato de ingesta está formado por unas estructuras especializadas llamadas quelíceras. Carecen del cerebro tripartito de los mandibulados, pues al no tener antenas, no necesitan un deuterocerebro que las controle.
b. Crustáceos: constituido por langostas, cangrejos, krill, y percebes (rémoras). Poseen cordones de tipo ancestral en forma de escalera unidos por comisuras. Tienen tres divisiones cerebrales: proto, deuto y tritocerebro.
c. Hexápodos o insectos: su cerebro es el más complejo del grupo y presenta las tres divisiones mencionadas en los crustáceos.

SISTEMA NERVIOSO EN DEUTERÓSTOMOS

Deuteróstomos no cordados

Los equinodermos (estrella de mar, erizo de mar) de simetría radial son el primer grupo de los no cordados. Presentan un SN simplificado, ya que tienen un anillo nervioso sensorial alrededor de la boca, que se deriva del ectodermo. Su sistema motor, derivado del mesodermo, es el lugar donde se forman los nervios periféricos que penetran en los brazos del animal. La relación entre estos dos sistemas no está muy bien establecida.

El otro grupo es el de los hemicordados, que poseen algunas características

de los cordados, pero en su desarrollo adquieren forma sésil y un sistema nervioso simplificado compuesto por un cordón dorsal y uno ventral. Este hallazgo ha hecho difícil establecer homologías con el sistema nervioso de los cordados, cuyo cordón nervioso siempre es dorsal.

Deuteróstomos cordados invertebrados

Este grupo comprende los organismos que en algún momento de su desarrollo poseen cuatro características fundamentales: notocorda, tubo neural dorsal, arcos faríngeos (branquiales) y cola postanal. Carecen de un esqueleto interno y, en su vida larvaria, presentan las características propias de los cordados, pero las pueden perder en la adultez.

Este grupo incluye dos taxones: urocordados y cefalocordados. En los urocordados, los adultos tienen formas sésiles, no se asemejan en nada a los adultos de los vertebrados, y su sistema nervioso es simplificado. Los cefalocordados mantienen su morfología larvaria en la adultez. Poseen las características del grupo, incluyendo un cordón nervioso dorsal y una porción cefálica no muy conspicua, que, por expresión genética, parece poseer mesencéfalo y rombencéfalo, pero no telencéfalo.

Deuteróstomos craniata o vertebrados

Los organismos de este taxón desarrollan un esqueleto a partir de la cabeza y, en su mayoría, tienen columna vertebral. En la actualidad, este grupo se denomina Craniata y agrupa a los vertebrados. Todos los organismos de este taxón poseen un esqueleto de la cabeza. Sin embargo, el grupo Myxinoidea, constituido por 60 especies de peces mixines, no desarrolla vértebras. Los órganos sensoriales especializados de los Craniata están relacionados con el encéfalo. Todos tienen un tubo neural dorsal cuya porción caudal está claramente segmentada y forma el cordón espinal en los vertebrados. Su porción cefálica expandida permite reconocer con dificultad expansiones o vesículas cerebrales primarias y secundarias.

Prosencéfalo o cerebro anterior

a. Diencéfalo: tálamo, hipotálamo, epitálamo.
b. Telencéfalo: constituido por los hemisferios cerebrales con corteza periférica (palio) y los núcleos basales profundos (subpalio).

Mesencéfalo o cerebro medio

Rombencéfalo o cerebro posterior

a. Metencéfalo: cerebelo (ausente en los mixines) y puente o protuberancia en los mamíferos.
b. Mielencéfalo: bulbo raquídeo o médula oblongada.

Agnatos: peces mixines y lampreas

Ninguno de los dos grupos presenta mandíbula. A diferencia de los mixines, las lampreas (50 especies) poseen columna vertebral. Los peces mixines pasan la mayor parte de su vida adulta enterrados en el fondo del agua, y se caracterizan por ser predadores con muy poco movimiento. Tienen una mancha ocular en lugar de ojos. Por el contrario, las lampreas permanecen enterradas en el fondo en su estado larvario, pero en la adultez son parásitos nadadores que utilizan su boca para adherirse a peces vivos y alimentarse de ellos.

El encéfalo de los mixines es más voluminoso y complejo que el de las lampreas. Presenta las tres divisiones propias de todos los vertebrados: prosencéfalo, mesencéfalo y rombencéfalo. El telencéfalo se caracteriza por presentar un lóbulo olfatorio expandido. Las lampreas tienen cerebelo; no así los mixines, que tal vez lo perdieron al evolucionar.

Vertebrados gnatostomados

Corresponde a los vertebrados con mandíbulas. Su clasificación filogenética por clases es la siguiente:

Chondrichthyes: peces con esqueleto cartilaginoso. Agrupan unas 1 000 especies, entre estas, los tiburones, las rayas y las quimeras.
Osteichthyes: peces con esqueleto óseo. Incluyen unas 30 000 especies y son los más diversos y abundantes de todos los vertebrados.
Amphibia: existen 6 000 especies, entre las cuales están las ranas y las salamandras.
Reptilia: reúne unas 9 500 especies tales como las serpientes, los lagartos, las iguanas, los cocodrilos y las tortugas.
Aves: se conocen unas 10 000 especies.
Mammalia: son 5 700 especies agrupadas en tres taxones.

a. Prototheria: formado por cinco especies ovíparas que lactan y tienen pelo, por ejemplo, el ornitorrinco.
b. Metatheria: constituido por unas 340 especies de marsupiales vivíparos. Poseen placenta, pero su vida prenatal es corta y deben terminar de desarrollarse por fuera del útero materno, por ejemplo, los canguros y los koalas.
c. Eutheria: compuesto por unas 5 300 especies de mamíferos placentarios, incluidos los humanos.

En este grupo, el SNC sigue el patrón general y está segmentado, al menos en gran parte. Los segmentos del cordón espinal están definidos macroscópicamente por la salida de dos pares raquídeos en cada uno de ellos. Aunque determinar la segmentación del encéfalo no es tan sencillo, la anatomía macro y microscópica y los estudios de expresión genética han permitido develar, al menos de forma parcial, la siguiente segmentación:

Rombencéfalo: está segmentado en siete rombómeras que se designan de R1 a R7.
Mesencéfalo: presenta dos segmentos, un neurómero ístmico y un neurómero mesencefálico.
Prosencéfalo: en el diencéfalo y el telencéfalo ventral es posible identificar segmentos denominados prosómeros, que se designan de P1 a P6. Se desconoce si hay segmentación en el telencéfalo dorsal y rostral, pero este se divide en palio (corteza) y subpalio (núcleos basales).

SISTEMA NERVIOSO CENTRAL EN VERTEBRADOS

Aunque en todos los vertebrados el SNC cefálico sigue el patrón ya mencionado, existen algunas diferencias generales entre los componentes mayores.

Cordón espinal

Está segmentado en todos los vertebrados, como se indicó anteriormente. La disposición de los cuerpos neuronales y sus proyecciones sigue un mismo patrón: los cuerpos neuronales están situados hacia el centro del cordón espinal (astas de sustancia gris), formando masas denominadas núcleos o columnas; las proyecciones neuronales (axones) se sitúan en la periferia, formando los cordones de sustancia blanca que rodean las astas. En todos los grupos, la organización funcional de los sistemas es bastante constante y se dispone en dirección dorso–ventral así: somatosensorial, viscerosensorial, visceromotor y somatomotor.

Bulbo raquídeo o médula oblongada

Mantiene la organización topográfica y funcional del cordón espinal. Allí se localizan los núcleos de los pares craneanos V a X. En los tetrápodos —

animales que en su evolución presentaron cuatro extremidades— el bulbo alberga los núcleos de los pares craneanos XI y XII. En los organismos que poseen sistema de línea lateral (peces y algunos anfibios), los centros de control se sitúan en esta estructura.

Sistema reticular

En todos los vertebrados, abarca el bulbo raquídeo y el mesencéfalo tegmental. En los mamíferos, al aparecer incluye también el puente. En las aves aparece una estructura similar al puente.

Cerebelo

Los mixines no tienen cerebelo, es posible que lo perdieran secundariamente. En todos los demás vertebrados, la estructura es similar: capa granular profunda, capa de Purkinje y capa molecular periférica. Los mamíferos desarrollaron hemisferios cerebelosos, que se comunican con el telencéfalo y el puente. A diferencia de los demás vertebrados, los cerebelos de las aves y los mamíferos han adquirido funciones cognitivas.

Mesencéfalo

La organización dorsoventral en todos es similar: tectum, que en los mamíferos corresponde al colículo superior; torus semicircularis, que en los mamíferos es el colículo inferior; y tegmento. En todos los vertebrados a excepción de los mamíferos, el tectum es el centro integrador de la visión. El tegmento posee los tractos masivos de fibras que descienden o ascienden para conectar segmentos cefálicos con segmentos caudales.

Diencéfalo

Epitálamo: incluye los núcleos habenulares del sistema límbico que se proyectan al tegmento. La mayoría posee glándula pineal, que es la encargada de producir melatonina, una hormona importante en los ciclos día–noche, reposo–alerta.
Tálamo: la porción dorsal recibe información visual, somatosensorial, auditiva y del gusto. En la mayoría, la vía visual termina en el palio dorsal, en los reptiles, en una estructura denominada cresta dorsoventricular, y en los mamíferos, en la corteza occipital.

Hipotálamo: en todos los vertebrados, su función principal es controlar el sistema endocrino.

Telencéfalo

En todos los Craniata, esta estructura recibe información olfatoria directamente desde los bulbos olfatorios, y en ninguno hay relevo en el tálamo. Por esta razón, se denominaba cerebro olfatorio a la porción del telencéfalo que recibía esta información. Se consideraba una característica ancestral o «primitiva», de ahí que también se llamara arqueocerebro. A excepción de los mamíferos y las aves, en los sistemas sensoriales de los vertebrados no hay organización topográfica.

En todos existe un palio y un subpalio ventral que rodean los ventrículos laterales pares. El palio se divide en medial, dorsal, lateral y ventral. El subpalio se segmenta en región septal y región paleoestriada o amígdala. En reptiles, el palio ventral es reemplazado por la cresta dorsal ventricular. En anfibios y reptiles, el palio medial corresponde al hipocampo de los mamíferos.

El palio se caracteriza por su tendencia a estar laminado. En los mixines, presenta cinco capas. En los peces óseos, peces cartilaginosos y anfibios, no está laminado, pero sí en los peces pulmonados. En los reptiles, tiene de tres a cuatro capas en parte de la corteza. Las aves poseen hiperpalio, una estructura laminada similar a la corteza visual, auditiva y somatosensorial de los mamíferos. En estos, la corteza no límbica posee seis capas, mientras que la límbica presenta entre tres y cuatro. En los mamíferos han aumentado las áreas funcionales.

CAMBIOS EN EL TAMAÑO ENCEFÁLICO DE VERTEBRADOS

Tamaño relativo

El tamaño de los encéfalos se mide directamente (peso) y luego se compara con el peso corporal del mismo individuo, con encéfalos de otras especies, o entre regiones del mismo. El peso encefálico puede ser cuantificado de forma absoluta (peso total sin relación con otro parámetro) o de forma relativa. El peso relativo se define como el tamaño esperado del encéfalo para un tamaño corporal dado. Esto nos permite conocer el llamado índice o cociente de encefalización, que es el peso del encéfalo observado dividido entre el peso esperado para su tamaño corporal.

En cuanto al peso relativo, las lampreas poseen un encéfalo menor que el de los peces mixines. Quizás esto se deba a que las primeras son parásitas y probablemente su evolución redujo el tamaño encefálico. Los peces óseos primitivos poseían encéfalos mayores que los agnatos del mismo tamaño, pero los peces cartilaginosos tenían encéfalos tres veces mayores que los peces óseos.

En los peces modernos, la correlación entre cartilaginosos y óseos es difícil porque los tamaños en cada grupo son muy variables. En los peces óseos, el tamaño relativo aumenta en las especies con tamaños corporales pequeños, lo cual constituye la norma. En general, los tamaños relativos de todos los grupos están dentro de los rangos esperados. En el grupo de los anfibios, las ranas y sapos poseen tamaños similares a los de los peces actinopterigios y sarcopterigios. Las ranas arbóreas tienen encéfalos mayores que los de las demás, pero el incremento debió ocurrir tardíamente en la evolución.

El tamaño relativo del encéfalo de los reptiles es similar al de las ranas terrestres. En serpientes y lagartijas sin extremidades, los encéfalos son bastante pequeños y su evolución debió ocurrir de forma independiente. Las iguanas y algunas lagartijas poseen encéfalos algo mayores. El tamaño encefálico en cocodrilos y caimanes corresponde al esperado, tal como ocurre en los dinosaurios. Incluso las tortugas, el grupo más primitivo, presentan tamaños relativos apropiados.

Los cambios en el tamaño encefálico relativo se evidencian en los otros dos grupos filogenéticos: las aves y los mamíferos. Las aves exhiben tamaños encefálicos mayores que los de los reptiles de medidas iguales. Por ejemplo, las avestruces —consideradas primitivas— poseen encéfalos cuatro veces mayores que los de los cocodrilos del mismo tamaño. Esto sugiere que, ya desde el origen de las aves, el tamaño de los encéfalos había aumentado. El grupo de los loros, búhos, pájaros carpinteros y aves canoras (Passerina) se caracteriza por tener encéfalos grandes para su tamaño. Los cuervos y grajos ostentan los encéfalos más grandes de esta especie. En general, en esta especie no ha disminuido el tamaño, excepto en algunas aves domésticas como el pavo.

Los mamíferos presentan encéfalos más grandes que los reptiles de tamaños similares. Los marsupiales tienden a poseer encéfalos menores que los monotremas y los placentarios del mismo tamaño. Los monotremas —considerados los más primitivos— tienen encéfalos similares a los placentarios del mismo tamaño. Parece ser que, en principio, los mamíferos primitivos tenían encéfalos del mismo tamaño que los marsupiales actuales; y luego aumentaron de forma independiente en los monotremas y los placentarios.

En algunos grupos de mamíferos placentarios, como los primates, elefantes y ballenas con dientes, el volumen relativo es mayor al esperado. Esto se debe a que filogenéticamente están muy alejados unos de otros y el

incremento se dio de manera independiente en cada grupo. Los primates, el grupo al cual pertenece el ser humano, se distinguen por presentar un aumento de tamaño algo mayor que los demás grupos. Murciélagos insectívoros y musarañas redujeron su tamaño.

Los cambios en el tamaño relativo tienen dos explicaciones posibles: pueden deberse a un incremento del encéfalo respecto al cuerpo o a una disminución del tamaño corporal respecto al encéfalo. En la mayoría de los casos, parece que el incremento ocurre por aumento del encéfalo, ya que generalmente no se observa disminución del tamaño corporal, sino aumento del mismo.

Tamaño absoluto

El incremento en el tamaño absoluto del encéfalo entraña una paradoja, ya que se relaciona con el incremento en el número de neuronas, y por lo tanto, con el aumento en el número de conexiones entre estas nuevas neuronas. Esto podría implicar dificultades en la formación de sinapsis funcionales durante el desarrollo. En otras palabras, el aumento del número neuronal no es proporcional al aumento de interconexiones; de manera que en la evolución se mantiene una conexión neuronal más o menos estable, pero se registra un incremento de la sustancia blanca con respecto a la gris. Esto ocasiona que, en la evolución funcional cerebral, se establezcan módulos funcionales con relativa independencia entre ellos para evitar que la comunicación interneuronal se haga confusa. Cuando el tamaño absoluto de los cerebros incrementa, su conectividad proporcional disminuye; es decir, el aumento de tamaño absoluto está siempre asociado con cambios en conectividad y función.

CAMBIOS MORFOFUNCIONALES EN HOMINOIDEOS Y HOMÍNINOS

La taxonomía de los primates se puede resumir así:

Prosimios: son los más primitivos y no tienen visión estereoscópica. Incluye los lémures, aya–aya y lórises.

Antropoides:

a. Tarseros: antes clasificados como prosimios.
b. Platirrinos: denominados monos del nuevo mundo, son los que habitan desde Centro América hasta Sur América. Muchos tienen cola prensil que sirve de agarre.

c. Catarrinos: llamados monos del viejo mundo, se localizan en África y Asia.
- Cercopithecoides: poseen cola pero no es prensil.
- Hominoideos: o simios; no poseen cola y es el grupo al cual pertenece el Homo sapiens.
  - Hylobathides: o simios pequeños; habitan en el sureste asiático y comprenden los gibones y los siamang.
  - Hominoidea: o grandes simios; agrupa a orangutanes (sureste asiático), gorilas (África), chimpancés (África) y homíninos. En la evolución, los homíninos se definen como las especies de hominoideos que poseen marcha bipedestre. Han existido varias, pero en la actualidad solo existe el ser humano.

Tamaño del encéfalo

En cuanto a tamaño relativo, los prosimios poseen un encéfalo mayor que los mamíferos de tamaño similar. En la divergencia entre los primates y los demás mamíferos, es posible que el aumento relativo surgiera por una disminución del tamaño corporal, debido a que los primates adquirieron vida arbórea. En cuanto al tamaño absoluto, el encéfalo de los primates era relativamente pequeño, su peso oscilaba entre 2 y 3 g, que corresponde al peso del encéfalo de las ratas de laboratorio actuales. Sin embargo, los cuerpos de tales primates eran más pequeños que los de las ratas. De manera que el aumento se correlaciona con el incremento de la neocorteza.

En la evolución de los antropoides, el tamaño corporal aumentó a la par con el tamaño global del encéfalo. Este patrón se observa en los Hominoideos y algunos de sus ancestros. En los chimpancés, el grupo más cercano filogenéticamente al Homo sapiens, el encéfalo pesa alrededor de 400 g, 76 % de los cuales corresponden a la corteza. Por esta razón, en comparación con otros mamíferos, los primates son socialmente más complejos. Es probable que el aumento de la neocorteza esté relacionado con la adaptación para interactuar en el medio, donde hay competencia y cooperación para obtener recursos. De igual manera, los chimpancés son frugívoros —tienen la habilidad para distinguir frutas maduras—, presentan longevidad aumentada, habitan un espacio complejo y extenso, y su tasa metabólica es alta.

Modificaciones funcionales y de conducta en primates

La función visual de los primates es bastante compleja, ya que es frontal y estereoscópica. La retina se proyecta a ambos colículos, lo que les permite

combinar la información procedente de ambos ojos y mejorar la percepción de profundidad. Esto resulta esencial para moverse por los árboles, cazar insectos y escoger frutos y hojas. Todos los primates poseen nueve áreas premotoras, a diferencia de los mamíferos no primates, que solo tienen entre dos y cuatro. Tienen un área ventral especializada para los movimientos de la extremidad anterior y la boca, que parece tener conexiones con el cordón espinal. Esta área puede considerarse la homóloga del área de Broca de los humanos. Es posible que parte de la destreza de los primates proceda de esta característica. Los primates tienen la capacidad de sentir a través de los pulpejos de los dedos de manos y pies, lo que incrementa su información sensorial. Esto se acompaña de la expansión de la corteza somatosensorial, que no tiene áreas homólogas en otros mamíferos y posee conexiones extensas con la corteza motora y el cordón espinal.

Otro cambio más específico involucra la corteza prefrontal, que en los mamíferos no primates solo presenta dos regiones mayores: la región orbitaria prefrontal, cuyas neuronas responden a estímulos externos que suelen ser gratificantes o significativos; y la corteza del cíngulo anterior, que procesa información acerca del estado corporal interno. Además de estas dos, la corteza prefrontal de los primates presenta una región lateral o granular, que cumple funciones importantes en la toma de decisiones y responde de forma más lenta. Esta región permite considerar interpretaciones alternativas de objetos externos y construir escenarios alternativos sobre cómo interactuar con estos. Cuando esta región se afecta, los primates tienen dificultades para recibir información del mundo exterior y manipularla. No está claro si surgió de una región preexistente o si apareció de novo.

La filogenia simplificada de los homíninos se puede resumir así:

Sahelanthropus tchadensis, Orrorin tugenensis: su estatus taxonómico no se ha aclarado (alrededor de 6 millones de años). Hallados en África.

Ardipithecus: primera especie que poseía marcha bipedestre (4.5 millones de años). Su volumen encefálico es similar al de los chimpancés (400 a 420 cm3). Hallados en África.

Australopithecus: son varias especies que abarcan un período de 4.2 a 2.5 millones de años. Su volumen encefálico es similar al de los chimpancés. Hallados en África.

Paranthropus: incluye varias especies similares a las anteriores pero más robustas (23 a 2 millones de años). Su encéfalo no presenta cambios. Hallados en África.

Homo habilis: primera especie asociada a herramientas de piedra (2.5 hasta 1.8 millones de años) y encéfalo de 600 a 650 cm3. Hallados en África.

Homo ergaster y Homo erectus: estas especies poseían encéfalos

mayores, en algunos casos de hasta 1 000 cm3. Se asocian al uso de fuego y la caza mayor. Los fósiles se encuentran en África y Asia.

Homo heidelbergensis: los fósiles datan de 500 000 a 250 000 años y se encuentran en África, Europa y, probablemente, Asia. Tienen encéfalos mayores de hasta 1 300 cm^3.

Homo neanderthalensis: datan entre 150 000 y 30 000 años. Tienen encéfalos de 1 300 a 1 450 cm3, un poco mayores que los del Homo sapiens actual. Solo se han encontrado en Europa y Oriente Medio. Aunque tenían comportamientos complejos, como enterrar a los muertos, no hay evidencias de que tuvieran lenguaje simbólico.

Homo sapiens: datan de 150 000 años hasta hoy. Su origen fue en África, pero en la actualidad se encuentran distribuidos en toda la tierra. Presentan evidencias de lenguaje simbólico —aunque el arte complejo solo apareció hace unos 40 000 años— y comportamiento muy complejo que ha modificado el ambiente de forma radical. Su tamaño encefálico oscilaba entre 1 350 y 1 400 cm^3.

Diferencias entre humanos y demás primates

La expansión de la neocorteza, que es un patrón primate, es mucho mayor en los seres humanos. En estos, la relación entre neocorteza y médula es de 60:1, mientras que en el chimpancé es de 30:1. Los humanos presentan extensas conexiones entre la neocorteza y el cordón espinal. Las proyecciones de la neocorteza invaden varias zonas neuronales que controlan los músculos de la laringe, la faringe, la boca, la lengua, los labios y la mandíbula, lo que es esencial para la producción de lenguaje hablado. Las conexiones directas entre la neocorteza y las neuronas de los músculos de la mano aumentan la destreza y la manipulación, una de las características comportamentales del Homo sapiens.

En cuanto a las áreas corticales relacionadas con el lenguaje hay varios aspectos a considerar. Las áreas de Broca y Wernicke, esenciales en el lenguaje, no son exclusivas de los humanos, ya que se han identificado en antropoides y prosimios. En efecto, existe una diferencia funcional, pero la estructura es similar (homóloga). El área 45 o porción rostral del área de Broca en macacos y humanos posee conglomerados de células piramidales en la parte interna de la capa iii y una capa IV bien desarrollada. El área de Wernicke en humanos es homóloga al área temporoparietal auditiva de otros primates.

La corteza visual primaria (estriada) abarca el 5 % de la neocorteza en chimpancés pero solo el 2 % en humanos. Algunas áreas se han ampliado, como el lóbulo temporal, que es mayor de lo esperado para el tamaño del humano. Probablemente, se expandió el componente dorsal, que procesa

información auditiva, incluyendo la del habla. Sin embargo, el aumento no es mucho mayor que el de otras áreas. Las áreas 39 y 40 en el lóbulo parietal con corteza somatosensorial no se han identificado en otros primates, y es probable que la corteza parietal haya aumentado, sin embargo, no hay datos suficientes al respecto.

El lóbulo frontal ha aumentado en los primates y aun más en humanos. La corteza prefrontal lateral ocupa el 29 % de la neocorteza en humanos, pero solo el 17 % en chimpancés. El área 10 es dos veces la de los chimpancés. El área 13, la corteza orbitofrontal, tiene más o menos la misma proporción en todos los simios. La corteza prefrontal lateral se expandió de manera significativa, pero no está claro si su aumento en homíninos corresponde al incremento absoluto del encéfalo.

La corteza parietal posterior tiene conexiones con áreas únicas en los humanos. La corteza temporal, que es ligeramente mayor de lo esperado, se conecta con grupos celulares del tálamo dorsal, como el núcleo medial dorsal y el núcleo pulvinar, que son bastante grandes en el Homo sapiens. El pulvinar aumentó principalmente su región dorsal, la cual tiene conexiones recíprocas con las cortezas prefrontal lateral, temporal y parietal. La porción ventral, que recibe información visual y la proyecta a la corteza visual primaria, no se modificó.

En los humanos, la corteza se activa durante la realización de diferentes tareas y parece ejercer un control mayor sobre otras áreas del encéfalo. Es posible que el aumento de la corteza prefrontal lateral les haya permitido a los humanos realizar actividades no convencionales, como encontrar soluciones novedosas a problemas de comportamiento. Además, puede que haya aumentado la capacidad para realizar actos voluntarios (libre albedrío). Los primates sin corteza prefrontal aprenden muchas cosas, pero son menos flexibles y tienen poca capacidad para escoger entre diferentes acciones alternativas y para determinar cuál puede ser la más gratificante. Entre las actividades no convencionales que el ser humano puede realizar gracias al aumento de la corteza prefrontal lateral están las siguientes:

Movimientos de los ojos: el ser humano puede contrarrestar el movimiento de seguimiento de luz en el campo visual periférico que hace por sacudidas. La corteza prefrontal lateral produce movimientos antisacudidas que suprimen el reflejo al inhibir la actividad de las neuronas del mesencéfalo y la médula. Esto es importante porque el humano utiliza los ojos para comunicarse y aumentar la información transmitida. Tanto chimpancés como humanos siguen la mirada de los otros, pero los segundos han desarrollado mejor esta actividad al poseer escalera blanca y una apertura de la hendidura palpebral más amplia en sentido transversal.

Movimientos de las manos: los monos pueden aprender a no apuntar hacia un estímulo que normalmente les llama la atención. Incluso pueden

apuntar hacia un objeto menos gratificante para despistar, por ejemplo, un alimento de menor tamaño en comparación con otros. Para realizar esto, tienen que inhibir el impulso de alcanzar el de mayor tamaño. La corteza prefrontal lateral está activa en estas acciones. Esto pudo facilitar en los seres humanos la capacidad para comunicarse mediante gestos manuales y el uso constructivo de las manos. Los chimpancés poseen cierta habilidad de manipulación, pero no se asemeja a la del Homo sapiens, que fabricó herramientas usando esta habilidad.

Habla: no se trata solo de producir sonidos complejos y controlados, también implica representar objetos simbólicamente. Para que esto ocurra, es necesario tener la capacidad de utilizar las palabras no solo para señalar lo que está presente, sino también lo que no está. Este desacople entre lo que se señala y lo que significa es conceptualmente análogo a «apuntar a otro lado», o incluso a las antisacudidas, porque se deben inhibir respuestas directas o impulsivas. El habla simbólica involucra muchas regiones, pero la corteza prefrontal lateral es primordial, porque allí se encuentra la porción rostral del área de Broca o área 45.

LECTURAS RECOMENDADAS

1. Arendt D, Denes A, Jékely G, Tessmar–Raible K. The evolution of nervous system centralization. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2008;363(1496):1523–28.
2. Holland LZ, Holland ND. Chordate origins of the vertebrate central nervous system. Curr Opin Neurobiol. 1999;9(5):596–602.
3. Holland LZ, Carvalho JE, Escriva H, Laudet V, Schubert M, Shimeld SM, et al. Evolution of bilaterian central nervous systems: a single origin? Evodevo. 2013;4(1):27.
4. Roth G, Dicke U. Evolution of nervous systems and brains. En: Galizia CG, Lledo PM, editores. Neurosciences – from molecule to behavior: a university textbook. New York: Springer–Verlag Berlin Heidelberg; 2013. p. 19–45.
5. Striedter GF. Principles of brain evolution. Sunderland: Sinauer Associates Inc.; 2005.

ÍNDICE ANALÍTICO

A

Acueducto cerebral, 18, 51, 52, 98, 100, 110, 111, 113, 114, 116, 134, 135, 136
Agenesia, 57
Agrina, 55
Agujero
    interventricular, 18, 83, 85, 86, 100, 101, 135, 177
    laterales (Luschka), 18, 52, 100, 111, 134, 135, 188, 191
    medial (Magendie), 18, 52, 100, 134, 135, 188, 191
    magno, 109, 111, 141, 142, 157, 162, 163, 187
Alveus, 97, 98
Alzheimer, enfermedad de, 123
Amígdala (complejo o cuerpo amigdalino), 32, 77, 88, 91, 92, 96, 97, 149, 158, 166, 205
    cerebelosa, 132, 189
Aracnoides, 18, 183, 184, 188, 190
Árbol de la vida, 26, 100, 133
Arco aórtico, 157, 158
Área
    de Broca, 81, 87, 208, 209, 210
    de Wernicke, 82, 87, 209
    postrema, 125
Arteria
    Adamkiewicz, 173
    AICA, 163, 164, 165, 166
    basilar, 78, 97, 98, 109, 110, 158, 162, 163, 164, 165, 166, 189
    carótida interna, 43, 158, 159, 160, 161, 163, 167, 169, 186, 187
    callosomarginal, 161, 162
    cerebelosa superior, 78, 110, 163, 164, 165
    cerebral anterior, 43, 158, 159, 161, 162, 166, 167, 168
    cerebral media, 43, 158, 159, 161, 162, 166, 167, 168, 169, 170
    cerebral posterior, 78, 110, 158, 161, 163, 164, 165, 166, 167, 169, 171
    comunicante anterior, 158, 159, 160, 162, 166, 167
    comunicante posterior, 158, 159, 161, 162, 163, 164, 167, 169
    coroidea anterior, 158, 159, 161, 162, 164, 166, 167, 171
    espinales anteriores, 162, 163, 165, 172, 173, 174
    espinales posteriores, 162, 165, 172, 173
    oftálmica, 158, 159, 161, 162
    pericallosa, 161, 162
    PICA, 162, 163, 165, 166, 172
    radiculares, 173
    vertebral, 159, 163, 164, 165
Arteriografía, 43, 44, 159, 160, 161, 163, 165
Asas paranodales, 22, 64
Astas
    anteriores, 34, 35, 145, 146, 147, 174
    laterales, 145, 174

posteriores, 34, 35, 118, 145, 146, 147, 173
Astrocitos, 27, 28, 52, 53, 65, 66, 68, 69, 70
Axolema, 23, 24, 25, 29
Axón, 21, 22, 23, 24, 25, 28, 29, 53, 54, 55, 61, 63, 64, 65, 67, 68

B

Brazos conjuntivos coliculares, 113
Bulbo
olfatorio, 69, 76, 110
raquídeo (médula oblongada), 17, 33, 42, 52, 83, 97, 98, 100, 109, 110, 111, 112, 113, 116, 119, 124, 125, 126, 127, 128, 130, 133, 142, 162, 200, 203, 204, 209, 210

C

Cadherinas, 54
Canales
iónicos, 24, 25, 199
iónicos voltaje–dependientes, 23, 24
semicirculares, 98, 122
Cápsula
externa, 89, 90
extrema, 89, 96
Cápsula interna, 91
brazo anterior de, 90, 95, 96, 97, 159
brazo posterior de, 90, 94, 128, 130, 158
rodilla de, 91
Cavum del septum lúcido, 84, 102, 103
Cerebelo, 17, 18, 26, 33, 52, 62, 99, 131, 132, 133, 134, 137, 148, 164, 175, 177, 185, 186, 203, 205
Cerebro, 17, 20, 26, 30, 31, 32, 40, 62, 74, 166, 176, 192, 202, 203
Cintilla (tracto)
olfatoria, 32, 76, 110
ópticas, 76, 77, 78
Circunvolución, véase giro
Cisterna
ambiens (superior), 99, 103, 164, 188, 189
interpeduncular, 188, 189
lumbar, 18, 38, 143, 144, 149, 188, 189
póntica, 188, 189
Schmidt–Lantermann, 68
Claustro (antemuro), 88, 89, 90, 92, 96, 97
Cóclea, 122
Cola de caballo (cauda equina), 34, 35, 38, 142, 143, 144, 149, 152, 189
Colículo
facial (eminencia teres), 111, 120, 121, 122, 125
inferiores, 33, 97, 99, 110, 113, 117, 118
superiores, 33, 97, 99, 110, 113, 114, 117, 118, 119
Comisura blanca anterior, 35, 76, 83, 85, 86
Conducción saltatoria, 24, 25
Cono
axonal, 21, 23, 24, 26, 54, 55, 63
medular, 34, 35, 141, 142, 189

Cordón espinal, 17, 18, 20, 26, 27, 34, 35, 38, 42, 49, 51, 52, 124, 128, 140, 172, 178, 204, 209
Corte
coronal, 20, 94
horizontal, 20, 87
sagital, 21, 82
Corteza
cerebelosa, 26, 53, 62, 110, 120, 126, 131, 133
cerebral, 26, 30, 37, 53, 62, 75, 81, 86, 87, 88, 176
Cresta neural, 49, 50, 51, 183
Cuerpo calloso, 30, 32, 33, 52, 55, 57, 75, 82, 83, 84, 87, 89, 90, 97
cuerpo del, 33, 41, 95, 97
esplenio (rodete) del, 32, 41, 82, 83, 85, 89, 90, 91, 99, 103, 114, 115, 133
pico (rostrum) del, 32, 33, 78, 82
rodilla del, 32, 33, 82, 83, 85, 89, 90, 91, 95, 96, 162
Cuerpo geniculado
lateral (externo), 55, 124, 125
medial (interno), 113, 164

D

Decusación, 21
de las pirámides, 124, 125, 126, 128
de los pedúnculos cerebelosos superiores, 117, 118
lemniscal, 126
Dendritas, 21, 22, 23, 24, 25, 29, 61, 62, 63, 65
Depolarización, 23, 24, 63, 64
Dermatoma, 36, 143
Diencéfalo, 30, 32, 50, 51, 52, 78, 203, 205
Duramadre, 18, 88, 100, 174, 176, 184,
185, 186, 187

E

Efrinas, 55
Eminencia media, 78, 79, 120, 125
Encéfalo, 17, 19, 29, 31, 33, 50, 75, 112, 157, 158, 161, 165, 174, 175, 183, 199, 203, 204, 206, 207, 208, 209
Endoneurio, 29
Engrosamiento
cervical, 34, 38, 141, 143, 189
lumbar, 34, 38, 141, 143, 173, 189
Ependimoglía, 27, 28, 101, 135
Epineurio, 29
Epitálamo (glándula pineal), 37, 52, 83, 85, 86, 103, 110, 111, 113, 125, 203, 205
Espacio
epidural, 187
perivascular, 70, 190
subaracnoideo, 18, 27, 37, 52, 99, 100, 101, 134, 142, 143, 184, 188, 189, 190, 191, 192
Espinas dendríticas, 61, 62, 63, 65
Estría
medular del tálamo, 83, 85, 86, 111, 120, 125
olfatorias, 76

F

Fascículo (haz)
- corticoespinal, 26, 91, 114, 117, 118, 119, 120, 121, 126, 128, 129, 148
- cuneatus, 34, 35, 118, 124, 125, 130, 142, 143, 146, 147, 148, 152
- dorsolateral (tracto de Lissauer), 145, 146
- espinocerebeloso posterior, 126, 146, 147
- espinocerebeloso anterior, 126, 148
- espinotalámico ventrolateral, 55, 118, 121, 123, 126, 127, 130
- grácil, 34, 35, 118, 124, 130, 142, 143, 146, 147, 148, 152, 173
- longitudinal medio, 118, 121, 122, 123, 126, 127
- rubroespinal, 115, 123, 126, 148
- tectoespinal, 113, 123, 126, 148, 149
- vestibuloespinal, 122, 126, 148, 149

Fibras
- comisurales, 87, 89
- de asociación, 87, 89
- de proyección, 87

Filopodios, 53, 54
Filum terminale (hilo terminal), 18, 34, 35, 141, 142, 144, 188, 189, 190
Fimbria, 85, 86, 91
Flóculo, 132, 133, 134, 164
Formación reticular, 114, 117, 118, 120, 121, 123, 126, 127, 129, 130, 133, 147
Fórnix, 83, 84, 85, 90, 92, 98, 101
- pilar anterior del, 86, 100, 102
- pilar posterior del, 91, 99

G

Ganglios, 28, 34, 50, 62, 117, 201, 202
- basales, 26, 88, 91
- de la raíz dorsal (posterior), 35, 142, 143, 144

Giro (lobulillo)
- angular, 80, 81
- cuña, 83, 84, 100, 164, 166
- cuadrilátero, 83, 149
- del cíngulo, 32, 33, 78, 81, 83, 84, 85, 87, 90, 95, 96, 97, 98, 99, 130, 159, 168 dentado, 62, 69, 91, 97, 98
- frontal interno, 81, 159, 168
- Heschl (transverso), 82
- lingual, 78, 83, 84, 100, 164, 166
- orbitario (orbitofrontal), 76, 77
- paracentral, 83, 118, 159, 168, 193
- parahipocampal, 32, 76, 77, 78, 83, 84, 87, 91, 97
- paraterminal, 84, 85
- postcentral, 80, 81, 82, 91, 118, 130
- precentral, 31, 80, 81, 86, 118, 148
- recto, 32, 76, 92, 95, 96, 166
- supramarginal, 79, 80, 81

Glándula pineal, véase epitálamo
Glía, 21, 22, 27, 28, 52, 65, 68, 69, 70
- radial, 52, 53

Globo pálido (paleoestriado), 88, 89, 90, 91, 92

Granulaciones aracnoideas, 175, 188, 190

H

Habénula, véase estría medular del tálamo
Hendidura sináptica, 25, 65
Heterotopía, 56
Hipotálamo, 32, 33, 52, 79, 83, 85, 86, 101, 149, 159, 191, 203, 205
Hipocampo, 32, 52, 77, 84, 87, 91, 92, 97, 98, 101, 103, 104, 166, 171, 205
Homúnculo, 80, 81, 168
Hoz
    del cerebelo, 174, 175, 185, 187
    del cerebro, 88, 96, 99, 100, 174, 175, 184, 185, 186, 187, 192, 193

I

Imágenes por resonancia magnética, 38, 40
Infundíbulo, 79, 86, 158, 185
Integrinas, 54
Ipsolateral, 21, 112, 115, 117, 119, 120, 122, 147, 148, 175
Istmo del cíngulo, 83, 85

L

Lamelipodios, 53, 54
Lemnisco
    lateral, 113, 117
    medial, 114, 117, 118, 121, 123, 126, 127, 129, 130, 162
Lámina
    basilar, 33, 109, 111, 187
    colicular, 33, 52, 97, 110, 111, 113
    de Rexed, 146
    medular externa, 91
    medular interna, 91
    terminal, 51, 83, 84, 85
Ligamento coccígeo, 18, 34, 187, 190
Líquido cefalorraquídeo (LCR), 18, 27, 35, 37, 38, 42, 52, 56, 69, 99, 142, 143, 175, 183, 184, 173
Locus coeruleus, 114, 117, 123
Lóbulo
    anterior del cerebelo, 131, 133, 148
    de la ínsula, 81, 82, 89, 96
    floculonodular, 131, 132
    frontal, 31, 32, 33, 79, 80, 82, 95, 96, 209
    límbico, 32, 78, 83
    occipital, 31, 32, 33, 84, 164 orbitofrontal, 32, 76, 80, 92, 95, 96, 161, 166
    parietal, 31, 32, 33, 81, 98, 99, 161, 209
    posterior del cerebelo, 131, 132, 133
    temporal, 31, 32, 56, 76, 77, 79, 82, 95, 96, 97, 98, 99, 161, 170, 209
    temporooccipital, 32, 76, 77, 91, 92, 165, 166
Lobulillo, véase giro

M

Médula oblongada, véase bulbo raquídeo

región basal de la, 126, 127
tegmento de la, 126
Meninges, 18, 182, 183, 184
Meningioma, 193
Mesencéfalo, 17, 19, 32, 33, 51, 52, 76, 83, 92, 97, 98, 109, 112, 113, 114, 115, 118, 128, 133, 164, 185, 203, 204, 205
Metencéfalo, 50, 51, 52, 203
Microglía, 27, 28, 68, 69
Microtúbulos, 22, 23, 27, 63, 64
Mielencéfalo, 50, 51, 52, 203
Mielina, 21, 22, 23, 27, 28, 29, 30, 55, 63, 64, 66, 67, 68, 75, 87
Mielografía, 37, 42
Miotoma, 36

N

Nervio
abducens (par craneano VI), 109, 110, 120, 121, 122, 124, 186
accesorio (par craneano XI), 124, 127, 147
espinales o raquídeos, 34, 35, 36, 42, 142, 143, 144
facial (par craneano VII), 109, 110, 111, 112, 120, 121, 122, 127
glosofaríngeo (par craneano IX), 124, 127
hipogloso (par craneano XII), 124, 127
oculomotor (par craneano III), 79, 97, 98, 109, 110, 112, 114, 116, 117, 120, 163, 164, 186
óptico, 50, 67, 78
trigémino (par craneano V), 109, 110, 111, 112, 119, 120, 122, 126, 186
troclear (par craneano IV), 55, 111, 113, 116, 117, 120, 186
vago (par craneano X), 124, 127
vestibulococlear (par craneano VIII), 110, 111, 120, 122, 127
Netrinas, 55
Neurofilamentos, 22, 23
Neuronas, 21, 22, 24, 25, 29, 34, 50, 52, 53, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 88, 114, 115, 123, 145, 146, 199, 201, 207
bipolares (pseudomonopolares), 23, 24, 65
Golgi tipo I, 23
Golgi tipo II, 23
monopolares, 23, 24
multipolares, 23, 24, 65
Nissl,
cuerpos de, 22
tinción de, 62, 65, 68
Nodo de Ranvier, 21, 22, 23, 24, 25, 64, 67, 68
Nódulo, 132, 133
Notocorda, 49, 50, 199, 202
Núcleo,
abducens, 128
accumbens, 95, 96
ambiguo, 127, 128
caudado, 84, 85, 88, 89, 90, 91, 93, 95, 96, 159, 161, 177
del hipogloso, 127, 128
dentado, 115, 118, 122, 133, 134
Edinger–Westphal, 114, 116, 117, 128
emboliforme, 134

espinal del trigémino, 119, 126, 127, 128
estriado (neoestriado), 88, 95
fastigial, 121, 134
globoso, 134
olivar inferior, 115, 126, 133
olivares superiores, 122
paleoestriado, véase globo pálido
pónticos, 120, 121, 122, 131, 133
pulvinar, 86, 209
rojo, 114, 115, 118, 119
solitario, 116, 127, 128
vestibulares, 118, 122, 127, 128, 133

O

Obex, 111, 125
Oligodendrocitos, 23, 27, 28, 52, 53, 66, 67
Olivas, 33, 124, 125, 126, 127
Opérculo, 79, 80, 81, 82, 168

P

Pedúnculos cerebelosos
inferiores, 33, 109, 110, 112, 124, 126, 131
medios, 33, 109, 110, 112, 119, 120, 121, 122, 131, 133, 134
superiores, 33, 109, 110, 112, 113, 117, 118, 119, 121, 131, 133, 134
Pedúnculos cerebrales, 33, 52, 76, 77, 97, 98, 109, 112, 113
Peñasco del temporal, 97, 98, 122, 186
Pericitos, 66, 69
Perineurio, 29
Piamadre, 18, 28, 62, 101, 134, 183, 184, 190
Pirámides, 33, 124, 126, 127, 162
Placa neural, 49, 50
Plexos coroideos, 101, 134, 135, 164, 176, 188, 191
Polígono cerebral (de Willis), 166
Potencial de acción, 23, 24, 25, 27, 63, 64, 67, 68
Prosencéfalo, 50, 51, 203, 204
Proteína morfogenética ósea, 50
Puente (protuberancia), 17, 33, 52, 83, 98, 101, 109, 110, 111, 112, 119, 120, 124, 128, 133, 134, 135, 204
región basal del, 120, 121
tegmento del, 122, 123
Purkinge, células de, 62
Putamen, 88, 89, 90, 93, 95, 96, 97, 161, 186

Q

Quiasma óptico, 32, 76, 77, 78, 83, 86

R

Raíces espinales, véase nervios espinales o raquídeos
Región
orbitofrontal u orbitaria, 32, 76, 92, 95, 96, 166

septal, 95, 96, 159, 166, 205
subcallosa, 83, 84, 85, 95
Ribosomas, 21, 22
Rodete, véase esplenio
Rombencéfalo, 50, 51, 202, 203, 204
Rostral, 19, 20

S

Schwann, células de, 23, 28, 29, 68
Segmentos espinales, 34, 36, 143, 144, 149, 150
Semaforinas, 55
Seno
cavernoso, 175, 176, 186, 187 petroso inferior, 175, 176
petroso superior, 175, 176
recto, 99, 100, 175, 176, 177, 185, 186, 187
sagital (longitudinal) inferior, 175, 177, 185
sagital (longitudinal) superior, 43, 88, 96, 97, 99, 100, 74, 175, 176, 179, 184, 185, 186, 187, 193
sigmoide, 175, 176, 178
transverso, 99, 100, 175, 176, 179, 185, 186
Septum lúcido, 30, 90, 95, 96, 97, 102, 177, 192
Sinapsis, 21, 22, 25, 26, 55, 63, 64, 65, 66, 200
Somatotópica, organización, 32, 80, 81, 115, 146
Somitas, 50
Subículo, 91, 97, 98, 101
Subtálamo, 52
Surco
basilar, 109, 110, 112, 119, 120, 164
calcarino, 78, 83, 84, 100
central (cisura de Rolando), 31, 79, 80, 81, 83
colateral, 77, 78
del cíngulo, 83
espinal anterior, 34, 35, 141, 142, 173
espinal posterior, 34, 35, 111, 125, 141, 142, 143, 147
hipotalámico, 85, 86
horizontal del cerebelo, 131, 132
horizontal del cerebro, 77, 81, 101
interhemisférico, 30, 32, 75, 76, 78, 82, 88, 95, 96, 99, 185
lateral (cisura de Silvio), 31, 32, 76, 79, 80, 81, 82, 95, 96, 161, 176
limitante, 125
marginal del cerebro, 83
marginal del tronco cerebral, 111
medial posterior, 111, 112, 120, 125
parietooccipital (perpendicular), 33, 83, 166
póntico inferior (bulboprotuberancial), 33, 109, 110, 111, 125
póntico superior, 33, 109, 110, 111
postcentral, 81
posterolateral, 131, 132
precentral, 80
preolivar, 124, 127
recto, 76
transverso, 82

Sustancia
blanca, 26, 27, 28, 30, 34, 37, 40, 62, 63, 88, 92, 97, 99, 145, 147, 148, 177, 204, 207
gelatinosa, 146
gris, 26, 27, 28, 34, 40, 52, 62, 63, 86, 145, 146, 204
gris periacueductual, 113, 114, 115, 116
negra, 88, 96, 114, 115
perforada anterior, 76, 159, 161
perforada posterior, 109, 112

T

Tálamo, 32, 33, 52, 83, 85, 86, 88, 90, 91, 97, 98, 101, 112, 120, 129, 158, 171, 176, 203, 205
Tanicitos, 27, 69
Tapetum, 91, 92
Tegmento, 110, 113, 114, 121, 205
Telencéfalo, 50, 51, 52, 115, 202, 203, 204, 205
Tentorio del cerebelo, 97, 98, 99, 100, 174, 175, 185, 186
Tomografía axial computarizada, 36
Torcular Herophili, 174
Tracto, véase fascículo
olfatorio, 76, 77, 110
Transporte
anterógrado, 63
retrógrado, 63
Trígono, véase fórnix
del hipogloso, 125
del vago, 125
Tronco cerebral, 17, 33, 107, 177, 178
Túber, 32, 76, 78, 79, 86
Tubérculo
cuneatus, 33, 34, 111, 118, 124, 125, 126, 130, 142, 143, 147
grácil, 33, 34, 111, 118, 124, 125, 126, 130, 142, 143, 147
mamilares, 32, 33, 76, 77, 78, 79, 83, 86, 164
Tubo neural, 49, 50, 55, 56, 202, 203

U

Uncus, 32, 76, 77, 85, 91, 96

V

Vellosidades aracnoideas, 188, 191
Velo
medular inferior, 100, 101, 134, 135, 191
medular superior, 100, 101, 110, 111, 113, 131, 132, 133, 134
Vena
basal (Rosenthal), 175, 177
cerebrales internas, 175, 176, 177
de Galeno (gran vena cerebral), 175, 176, 177, 188
de Labbé, 176, 177
de Trolard, 176, 177
espinales, 178
yugular interna, 175

Ventrículo
cuarto, 18, 33, 51, 52, 100, 101, 109, 110, 111, 112, 121, 122, 123, 125, 127, 133, 134, 135, 136, 162, 188, 191
quinto, 102
tercer, 18, 27, 37, 51, 52, 83, 86, 97, 98, 100, 101, 112, 114, 134, 135, 164, 191
Ventrículo lateral, 18, 37, 51, 84, 100, 184
cuerno anterior (frontal) del, 85, 89, 90, 96, 101, 102
cuerpo del, 89, 90, 97, 98, 101, 164
cuerno posterior (occipital) del, 90, 99, 101
cuerno lateral (temporal) del, 89, 91, 92, 97, 98, 101
Vermis, 26, 33, 92, 99, 131, 132, 147, 164, 172, 177

Esta edición consta de 300 ejemplares.
Se imprimió en diciembre de 2016
en la Editorial Kimpres S.A.S.
Se utilizaron caracteres Myriad Pro 11,5 puntos,
Lato Black, Bold y Regular.
Tiene un formato 21×29,6 centímetros. La carátula
va en propalcote de 240 gramos
y las páginas interiores
en propalmate de 90 gramos.
Bogotá, D.C., Colombia

editorial.unal.edu.co

editorial un

MMXVI

Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta publicación, por cualquier medio o procedimiento, sin para ello contar con la autorización previa, expresa y por escrito del editor.

©

El E-Pub que usted tiene en sus manos fue realizado por Editorial Universidad Nacional de Colombia/ www.editorial.unal.edu.co

Universidad Nacional de Colombia
2016

Síganos en redes sociales

medicina básica

Neuroanatomía: Fundamentos de neuroanatomía estructural, funcional y clínica busca facilitar el aprendizaje gradual y progresivo de la anatomía superficial e interna del sistema nervioso central mediante una descripción clara, organizada y sencilla de sus estructuras (pares craneanos, nervios espinales, tractos, territorios vasculares, etc.), cuyas alteraciones se ilustran en cada capítulo por medio de diferentes casos clínicos. Asimismo, la gran cantidad de imágenes a color de piezas anatómicas, piezas histológicas, tomografías axiales, resonancias magnéticas y angiografías permiten una lectura amena y una correlación entre la descripción de las estructuras neuroanatómicas y su aplicación clínica.

FACULTAD DE MEDICINA
Sede Bogotá

editUNal

SESQUICENTENARIO
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Manual de edición
académica

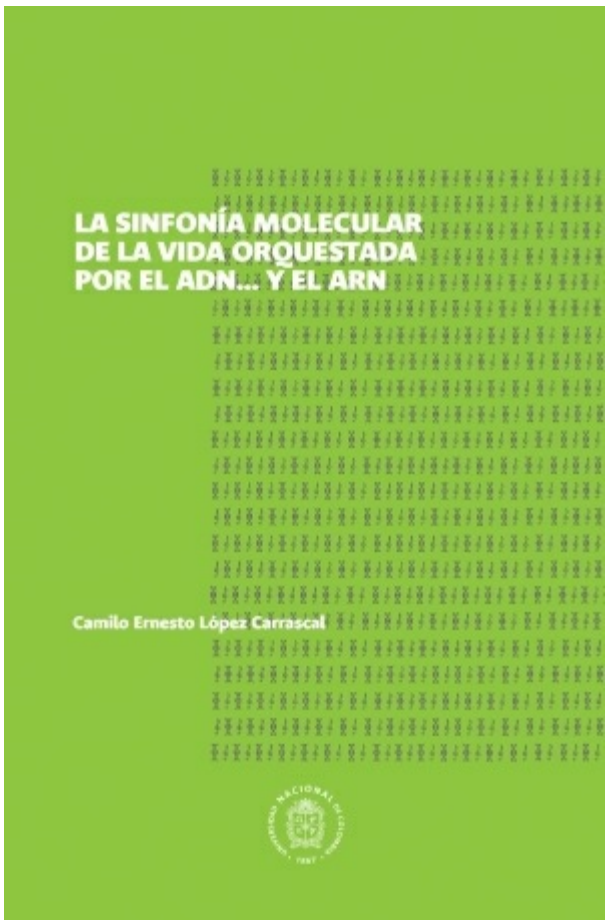
Manual de edición académica

Beltrán, Jorge Enrique
9789587830361
480 Páginas

Cómpralo y empieza a leer

Este manual recoge la información necesaria para comprender el proceso de edición de una obra académica. ya sea un libro o una revista, cumpliendo con los más altos estándares de calidad. Con base en una investigación apuntalada por su amplia experiencia en las labores concernientes, el autor describe detalladamente las características propias de dichas publicaciones y los pasos a seguir para adelantar con éxito un proyecto de este tipo, desde el momento en que se presenta el manuscrito ante el respectivo comité editorial, pasando luego por un proceso de corrección y diagramación, hasta que los archivos definitivos son enviados a impresión. Cabe destacar que esta obra incluye tres herramientas imprescindibles para autores, editores y correctores: un manual del autor, que explica los derechos, obligaciones y acciones de este durante el proceso de edición de su obra; un modelo de pauta editorial, que contiene los más habituales lineamientos y usos ortotipográficos y gramaticales del sector académico, y un resumen de los tres sistemas de referencia bibliográfica más usados(APA, MLA y Chicago parentético).

Cómpralo y empieza a leer


LA SINFONÍA MOLECULAR
DE LA VIDA ORQUESTADA
POR EL ADN... Y EL ARN
Camilo Ernesto López Carrascal

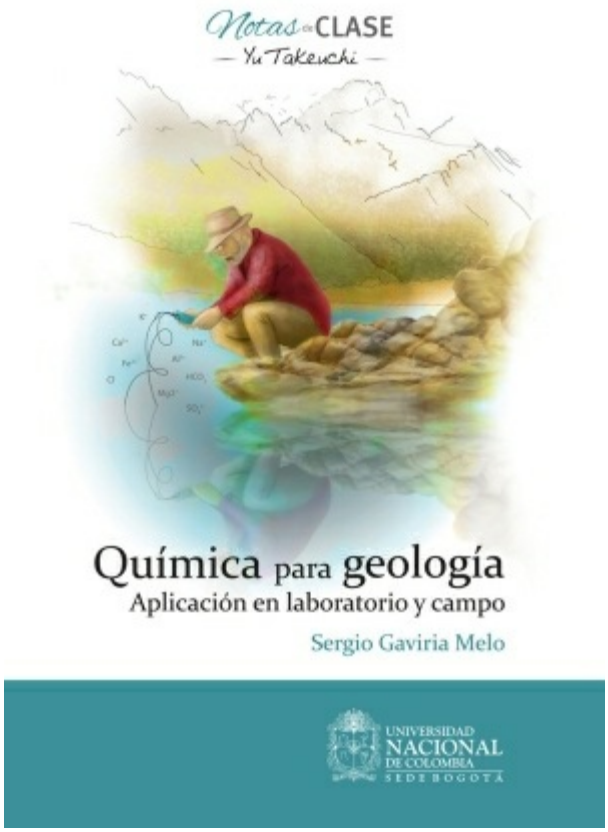
Sinfonía molecular de la vida orquestada por el ADN... y el ARN

López Carrascal, Camilo Ernesto
9789587759440
216 Páginas

Cómpralo y empieza a leer

Este no es un libro de texto, es una invitación a maravillarse con la biología molecular. Mientras que el curioso comprenderá la esencia y las consecuencias de algunos procesos moleculares, el especialista querrá conocer los detalles."La sinfonía molecular de la vida orquestada por el ADN... y el ARN" pretende acercarse a estos dos grupos de lectores a través de la descripción de algunos mecanismos moleculares que pueden resultar atractivos para unos y otros. Desde hace algunos años la biología molecular ha logrado permear un amplio rango de esferas del conocimiento académico y científico, incluyo, varios de sus conceptos e ideas han comenzado a hacer parte de la cultura general de la sociedad debido a sus alcances en todos los ámbitos.

Cómpralo y empieza a leer


Notas de CLASE
— Yu Takeuchi —
Química para geología
Aplicación en laboratorio y campo
Sergio Gaviria Melo
UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ

Química para geología

Gaviria Melo, Sergio
9789587754308
214 Páginas

Cómpralo y empieza a leer

A medio camino entre la escala del Universo y la de las partículas atómicas, la estructura y composición de la Tierra responde a reacciones entre los elementos químicos, que dan origen a los más variados compuestos. Dentro de la geósfera los procesos han ocurrido bajo condiciones de presión y temperatura extremas, que han asociado los elementos por su afinidad geoquímica y, como consecuencia, los han separado en capas concéntricas (núcleo, manto y litósfera). Al contacto con la hidrósfera y la atmósfera, las rocas liberan iones solubles en el agua y crean nuevos productos por hidratación e hidrólisis. La reactividad ácido-base y la presencia o ausencia de oxígeno, que determina la reactividad oxidante o reductora del medio, orientan esas reacciones en los más diversos ambientes geoquímicos. Los seres vivos, entre ellos los humanos, también ejercen su influencia modi¬ficando la velocidad e intensidad de tales reacciones. Con brevedad y precisión, Química para geología brinda a estudiantes de geología y profesionales de ciencias afines las herramientas para comprender, a partir de la ciencia química, tan amplia realidad. Para tal efecto, se concentra en los conceptos claves requeridos en el aula, el uso de los instrumentos y procedimientos de análisis en el laboratorio, y la aplicación en campo tanto de estos como de aquellos. Se trata, pues, de un texto imprescindible para quien quiera adentrarse en el estudio de la geoquímica desde una perspectiva teórico-práctica.

Cómpralo y empieza a leer

Colección CES
Microhistorias de la transgresión
Max S. Hering Torres
Editor principal
Nelson A. Rojas
Coeditor
Universidad del Rosario
Universidad Cooperativa de Colombia
Universidad Nacional de Colombia
Sede Bogotá
Facultad de Ciencias Humanas
Centro de Estudios Sociales - CES
Grupo Prácticas Culturales, Imaginarios y Representaciones

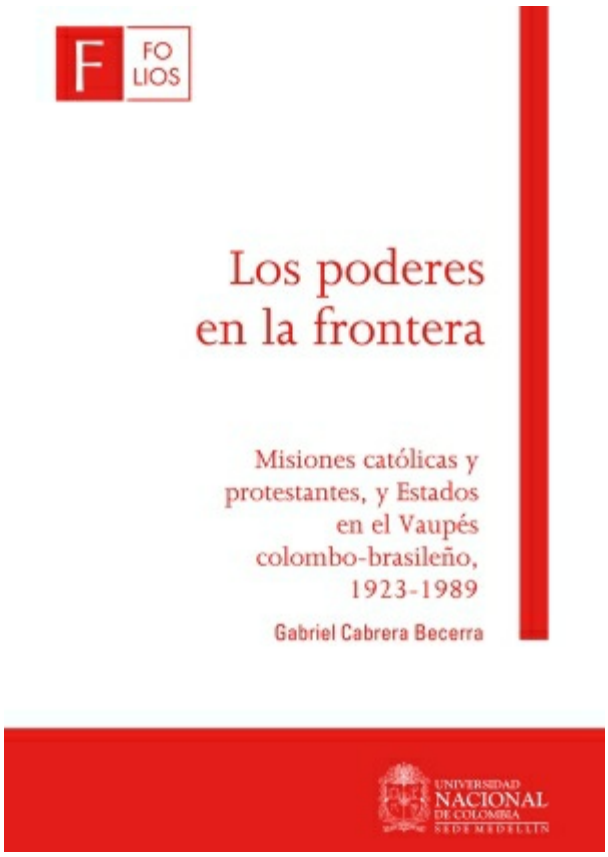
Microhistorias de la transgresión

Hering, Max
9789587754414
488 Páginas

Cómpralo y empieza a leer

El objetivo del libro es analizar las transgresiones en diferentes momentos históricos de Colombia, interpretadas no solo como delitos y violaciones del orden jurídico, sino también como infracciones a preceptos morales y sociales que fueron construidas como pecados, delitos y patologías. Con el acercamiento microhistórico, se busca evidenciar y debatir las conexiones entre las estructuras y las posibilidades de agencia de los individuos. El objetivo de esta aproximación es partir de lo particular para rescatar redes de significación que posibiliten recuperar prácticas cotidianas, voces silenciadas, espacios de agencia y su tensión con las relaciones de poder.

Cómpralo y empieza a leer


FO
LIOS
Los poderes en la frontera
Misiones católicas y protestantes, y Estados en el Vaupés colombo-brasileño, 1923-1989
Gabriel Cabrera Becerra
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN

Los poderes en la frontera

Cabrera Becerra, Gabriel
9789587753691
458 Páginas

Cómpralo y empieza a leer

En el año 2 014, la presencia religiosa católica en la zona fronteriza del Vaupés colombo-brasileño ha cumplido un siglo de labores ininterrumpidas; a ella se sumó, desde mediados del siglo xx, el trabajo de los protestantes. Este estudio ofrece al lector un panorama completo del contexto de las misiones en el orden de la Iglesia católica y en el mundo protestante, abordando en el primero las acciones de los javieres y lauritas, que actuaron en Colombia, como de los Salesianos e Hijas de María Auxiliadora que trabajaron en Brasil, y en el segundo la Misión de Nuevas Tribus y el Instituto Lingüístico de Verano. La investigación desarrolla las relaciones entre los misioneros católicos y protestantes, detalla la actuación de la mujer misionera, como también las labores de las dependencias gubernamentales ocupadas de la política indígena en la región que, en Brasil, comienza tempranamente con el trabajo del Servíco de Protecáo aos Índios, pero que en Colombia es más tardía, con la División de Asuntos Indígenas. Igualmente, se analiza el desempeño de otros organismos durante el período de estudio. La estructura y el exhaustivo trabajo documental que soportan este texto permiten obtener una visión comparada del acontecer histórico y la manera como los misioneros católicos y protestantes formulan y desarrollan su visión particular del cambio cultural entre los indígenas, mediante la modificación de elementos de su vida cotidiana. Simultáneamente, en el texto se detallan diversos hechos que descartan la pasividad de los indígenas y permiten percibir las respuestas de estos a los trabajos misionales.

Cómpralo y empieza a leer

Índice

Portadilla 3
Página legal 4
AUTORES 6
CONTENIDO 7
PREFACIO 17
AGRADECIMIENTOS 19
Capítulo 1 CONCEPTOS GENERALES 20
Orientación anatómica 24
Planos de orientación 26
Otros términos de uso común 27
Introducción a la histología del sistema nervioso 27
Neuronas 28
Glía en el sistema nervioso central 35
Glía en el sistema nervioso periférico 37
Introducción a la neuroanatomía 38
Cerebro 39
Tronco cerebral 44
Cerebelo 45
Cordón espinal 45
Introducción a la neurorradiología clínica 48
Tomografía axial computarizada (TAC) 49
Imágenes por resonancia magnética (IRM) 52
Neuroangiografía 58
Referencias 59
Capítulo 2 DESARROLLO DEL SISTEMA NERVIOSO 60
Formación de las vesículas 64
Migración neuronal 67
Crecimiento axonal 68
Signos no difusibles para el crecimiento axonal 69
Signos difusibles para el crecimiento axonal 70
Formación de sinapsis 71
Ejercicios clínicos 71
Referencias 73

Capítulo 3 HISTOLOGÍA DEL SISTEMA NERVIOSO 74
Neuronas 76
Glía 82
Lecturas recomendadas 87
Capítulo 4 CEREBRO 89
Configuración superficial 91
Cara inferior 92
Cara lateral 96
Cara medial 101
Configuración interior 108
Cortes horizontales 108
Ejercicios clínicos 115
Cortes coronales 118
Sistema ventricular 125
Ejercicios clínicos 130
Referencias 131
Capítulo 5 TRONCO CEREBRAL 133
Configuración superficial 135
Mesencéfalo 139
Sustancia negra 143
Núcleos rojos 143
Sustancia gris periacueductual 144
Fascículos del mesencéfalo 147
Ejercicios clínicos 148
Puente o protuberancia 149
Región basal del puente 151
Tegmento del puente 152
Ejercicio clínico 155
Médula oblongada o bulbo raquídeo 155
Región basal de la médula 157
Tegmento de la médula 158
Ejercicios clínicos 164
Cerebelo 165
Cuarto ventrículo 170
Plexos coroideos 170
Ejercicios clínicos 172

Referencias 174
Capítulo 6 CORDÓN ESPINAL 175
Configuración exterior 177
Configuración interior 182
Sustancia gris 182
Sustancia blanca 185
Ejercicios clínicos 188
Referencias 193
Capítulo 7 CIRCULACIÓN DEL ENCÉFALO Y DEL CORDÓN ESPINAL 194
Circulación arterial del encéfalo 196
Circulación anterior 197
Circulación posterior 203
Polígono cerebral o de Willis 208
Ejercicios clínicos 211
Circulación arterial del cordón espinal 216
Arterias radiculares 217
Arterias espinales posteriores 218
Arteria espinal anterior 218
Ejercicio clínico 218
Circulación venosa del encéfalo 219
Senos venosos 219
Venas cerebrales 221
Venas del tronco cerebral y del cerebelo 222
Circulación venosa del cordón espinal 224
Ejercicio clínico 224
Referencias 225
Capítulo 8 MENINGES 226
DURAMADRE 229
Duramadre craneana 229
Duramadre raquídea 233
Aracnoides 234
Piamadre 237
Líquido Cefalorraquídeo 238
Ejercicios clínicos 239

Referencias 242
Capítulo 9 EVOLUCIÓN DEL SISTEMA NERVIOSO 243
Origen del sistema nervioso 245
Sistema nervioso en protóstomos 247
Protóstomos Lophotrochozoa 248
Protóstomos Ecdysozoa 249
Sistema nervioso en deuteróstomos 249
Deuteróstomos no cordados 249
Deuteróstomos cordados invertebrados 250
Deuteróstomos craniata o vertebrados 250
Sistema nervioso central en vertebrados 252
Cordón espinal 252
Bulbo raquídeo o médula oblongada 252
Sistema reticular 253
Cerebelo 253
Mesencéfalo 253
Diencéfalo 253
Telencéfalo 254
Cambios en el tamaño encefálico de vertebrados 254
Tamaño relativo 254
Tamaño absoluto 256
Cambios morfofuncionales en Hominoideos y Homíninos 256
Tamaño del encéfalo 257
Modificaciones funcionales y de conducta en primates 257
Diferencias entre humanos y demás primates 259
Lecturas recomendadas 261
Índice analítico 262
Página institucional 273
Créditos 274
Cubierta posterior 275